



© Shutterstock

# Escenarios de cambio climático regionalizados para la planificación de medidas de adaptación

Conceptos básicos, herramientas de visualización y buenas prácticas

Serie de  
Estudios Temáticos  
EUROCLIMA

# 19

**Comisión Europea**

Dirección General de Asociaciones Internacionales  
1049 Bruselas, Bélgica  
Tel: + 32 (0)2 299 11 11  
Correo electrónico: [info@euroclimaplus.org](mailto:info@euroclimaplus.org)

**Internet**

<https://ec.europa.eu/international-partnerships>

Puede consultar el Estudio Temático en Internet en:

<https://ec.europa.eu/international-partnerships/documents-library>  
<http://euroclimaplus.org>

# Escenarios de cambio climático regionalizados para la planificación de medidas de adaptación

Conceptos básicos, herramientas de visualización y buenas prácticas

**Serie de Estudios Temáticos  
EUROCLIMA+**

# 19



Financiado por  
la Unión Europea



**FIIAPP**  
COOPERACIÓN ESPAÑOLA



## Créditos

La serie de Estudios Temáticos es financiada por la Unión Europea, en el marco del programa EUROCLIMA de la Comisión Europea. La presente publicación ha sido elaborada con la asistencia de la Unión Europea. El contenido de la misma es responsabilidad exclusiva de los autores y en ningún caso debe considerarse que refleja los puntos de vista de la Unión Europea.

### **Autores del Estudio Temático 19**

Petra Ramos Calzada, Pilar Amblar Frances, Antonio Serrano de la Torre, Miguel Herrero, Alfonso Hernanz Lázaro, Jorge Sanchís Lladó, Asunción Pastor Saavedra, J. Ignacio Villarino Barrera, Inmaculada Abia Llera, Nieves Garrido del Pozo, Ernesto Rodríguez Camino.

### **Revisión y redacción**

Equipo FIIAPP

### **Diseño**

Alexandra Cortés

### **Maquetación**

[www.espaisimbiosi.com](http://www.espaisimbiosi.com)



### **Citación:**

Comisión Europea (2021). Escenarios de cambio climático regionalizados para la planificación de medidas de adaptación. Conceptos básicos, herramientas de visualización y buenas prácticas. Serie de Estudios Temáticos EUROCLIMA+, n.19. Programa EUROCLIMA, Dirección General de Asociaciones Internacionales. Comisión Europea. Bruselas, Bélgica. 76 pp.

PDF ISBN: 978-92-76-42976-0 ISSN: 2363-2585 DOI: 10.2841/968974 MN-AL-21-006-ES-N

© Unión Europea, 2021

Bruselas, Bélgica, 2021

Reproducción autorizada siempre que se cite la fuente.

[www.euroclimaplus.org](http://www.euroclimaplus.org)

# Contenido

Siglas y acrónimos .....	6
Resumen .....	7
Prólogo del SICA .....	8
Prólogo de la Dirección General de Asociaciones Internacionales .....	10
Prólogo de FIIAPP .....	12
1. Introducción .....	15
2. Presentación del estudio .....	17
3. Conceptos básicos.....	21
3.1. Tiempo y clima .....	21
3.2. Incertidumbres en las proyecciones de cambio climático.....	23
3.3. Modelos climáticos.....	32
3.4. Predicciones y proyecciones climáticas.....	36
3.5. Proyecciones regionalizadas de cambio climático.....	37
3.5.1. Métodos de regionalización dinámicos.....	39
3.5.2. Ventajas e inconvenientes de los modelos climáticos regionales frente a los globales.....	42
3.5.3. Métodos de regionalización estadísticos .....	43
3.5.4. Ventajas e inconvenientes de los métodos de regionalización dinámicos frente a los estadísticos.....	45
4. Herramientas de visualización de proyecciones regionalizadas de cambio climático.....	49
4.1. Visualización y archivo de datos de proyecciones.....	49
4.2. Visor de escenarios de cambio climático EUROCLIMA+ para Centroamérica.....	50
4.3. Papel de los usuarios en el diseño del visor de proyecciones de cambio climático.....	54
5. Buenas prácticas en el uso e interpretación de los datos del visor.....	57
6. Servicios climáticos basados en proyecciones regionalizadas de cambio climático.....	65
7. Conclusiones.....	69
Referencias .....	73

## Siglas y acrónimos

AEMET	Agencia Estatal de Meteorología de España
AGCM	Modelo climático atmosférico (en inglés)
AOGCM	Modelo de Circulación General Atmósfera-Océano (en inglés)
AR5	Quinto Informe de Evaluación del IPCC (en inglés)
AR6	Sexto Informe de Evaluación del IPCC (en inglés)
CDS	Repositorio de datos climáticos (en inglés)
CIMHET	Conferencia de Directores de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Iberoamericanos
CMIP	Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (en inglés)
CMIP5	Fase 5 del Proyecto de intercomparación de modelos acoplados (en inglés)
CMIP6	Fase 6 del Proyecto de intercomparación de modelos acoplados (en inglés)
CMNUCC	Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CODIA	Conferencia de Directores Iberoamericanos del Agua
CORDEX	Experimento regional coordinado de reducción de escala del clima (en inglés)
CRRH-SICA	Comité Regional de Recursos Hidráulicos del Sistema de Integración Centroamericana
CSIC	Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España
ESM	Modelos del sistema terrestre (en inglés)
EU-LAC	V Cumbre de la Unión Europea con América Latina y el Caribe (en inglés)
GCM	Modelo climático global o modelo de circulación general (en inglés)
GFCS	Marco Mundial para los Servicios Climáticos (en inglés)
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (en inglés)
LAM	Modelo de área limitada (en inglés)
MOS	Estadísticas de salida del modelo (en inglés)
OECC	Oficina Española de Cambio Climático
OGCM	Modelo climático oceánico (en inglés)
OMM	Organización Meteorológica Mundial
pdf	Funciones de densidad de probabilidad
PP	Pronóstico Perfecto
RCM	Modelo climático regional (en inglés)
RCP	Sendas Representativas de Concentración (en inglés)
RIOCC	Red Iberoamericana de Oficinas de Cambio Climático
SRES	Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (en inglés)
SSP	Trayectorias socioeconómicas compartidas (en inglés)
WG	Generadores de tiempo (en inglés)

## Resumen

La consecución del objetivo de adaptación que aparece recogido en el artículo 7 del Acuerdo de París fomenta el **desarrollo de los Planes Nacionales de Adaptación al Cambio Climático y, en consecuencia, la importancia de disponer a nivel nacional de escenarios climáticos o proyecciones regionalizadas**. La necesidad de adaptación a los impactos que produce el cambio climático requiere la evaluación de los mismos en ecosistemas y sectores afectados por las condiciones climáticas. Por lo tanto, es **necesario conocer el estado del clima futuro en su misma escala espacial**. Los modelos globales del clima proporcionan proyecciones del clima futuro a una resolución espacial (100 o 200 km) que no resulta adecuada para este propósito, por lo que, es **necesario aumentarla mediante técnicas denominadas de regionalización o de reducción de escala**.

Los **servicios meteorológicos tienen la responsabilidad, en la mayoría de los países, de preparar escenarios regionalizados de cambio climático** que, además de su prescriptiva inclusión en las comunicaciones nacionales sobre el cambio climático para la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), son un requerimiento para los estudios de impacto y la definición de estrategias de adaptación en los diferentes ecosistemas y sectores de actividad sensibles a las condiciones climáticas.

Con el fin de mejorar sus servicios climáticos, los 6 países centroamericanos (Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Panamá y Costa Rica) solicitaron apoyo a EUROCLIMA+ para la generación de escenarios climáticos regionalizados con una resolución adecuada para tener en cuenta la heterogeneidad climática de la región y que permitiera

la toma de decisiones sobre futuros impactos del clima, incluyendo la planificación de las medidas de adaptación necesarias, en línea con la propuesta de acción acordada por las tres redes iberoamericanas de meteorología, agua y cambio climático en el taller intersectorial celebrado en La Antigua en diciembre de 2016.

Con el objeto de responder a estas necesidades, se puso en marcha, **dentro del programa EUROCLIMA+, la acción “Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para Centroamérica”**, con tres objetivos principales: a) **Producción de escenarios regionalizados** de cambio climático para la región Centroamericana por distintos métodos junto con la documentación asociada; b) **Capacitación y formación** necesaria para producir dichos escenarios; c) Desarrollo de una **herramienta de visualización** para un manejo y descarga amigable de los datos de escenarios regionalizados.

En este marco, la Fundación Internacional y para Iberoamérica de Administración y Políticas Públicas (FIIAPP) presenta el estudio temático “Escenarios de cambio climático regionalizados para la planificación de medidas de adaptación: conceptos básicos, herramientas de visualización y buenas prácticas”, en el que se abordan, tras la introducción a los conceptos básicos, que incluye una descripción de los métodos de regionalización (Capítulo 3), las herramientas de visualización y archivo de proyecciones regionalizadas incluyendo una descripción del visor desarrollado en el marco de la acción (Capítulo 4). Finalmente, se incluye un resumen de buenas prácticas en el uso e interpretación de los datos del visor (Capítulo 5) y una breve descripción del procedimiento de generación de servicios climáticos basados en proyecciones regionalizadas de cambio climático (Capítulo 6).



## Prólogo del SICA

### Berta Alicia Olmedo Vernaza

Secretaria Ejecutiva del Comité Regional de Recursos  
Hidráulicos (CRRH)  
Sistema de Integración Centroamericana (SICA)

Cada vez escuchamos con mayor frecuencia que los efectos del cambio climático producen alteraciones en los patrones normales de lluvia y temperatura entre otras variables climáticas. En el 2020 fuimos testigos de la intensa actividad de huracanes que se generó en el Atlántico, los huracanes ETA e IOTA impactaron directamente sobre sobre Nicaragua y Honduras y produjeron afectaciones en casi todos los países de Centroamérica. **La temporada de huracanes de 2020 fue la más activa de la historia.** Este panorama de exceso de lluvia contrasta con los episodios de sequía intensas y/o prolongadas que también afectan recurrentemente a la región, especialmente la zona conocida como Corredor Seco Centroamericano, donde particularmente, se ven afectados los medios de vida, generando fuertes impactos en la seguridad alimentaria y nutricional de los pobladores.

Ante la evidencia de orden científico y de orden vivencial se hace imperativo trabajar en planes de adaptación que contengan la mayor cantidad de información científica disponible, es aquí donde **el Visor de Escenarios de Cambio Climático se convierte en una herramienta poderosa** como fuente de información para guiar los distin-

tos planes, programas y estrategias orientadas a generar procesos de adaptación en los distintos sectores socioeconómicos que se propongan los gobiernos de los países centroamericanos.

El Visor Centroamericano de Escenarios de Cambio Climático provee información valiosa **con el potencial de guiar el análisis de impacto del cambio climático** en los distintos sectores socioeconómicos de Centroamérica. El visor centroamericano proporciona información sobre el comportamiento futuro de las variables climáticas como lluvia, temperatura y sus variables derivadas, también ofrece escenarios para otras variables que anteriormente no se trabajaban como lo son el viento, la humedad relativa, la fracción nubosa, la evaporación y la escorrentía. Toda esta información para un grupo de modelos dinámicos y estadístico permitiendo introducir el tema de la incertidumbre, propia de trabajar en una línea de tiempo tan lejana en el futuro como el 2100 y los intervalos de tiempo inferiores a este período.

La información contenida en el Visor de Escenarios de Cambio Climático ofrece una oportunidad sin precedente para nuestra región, es justamente, el tener información obtenida bajo la misma metodo-

“*La información contenida en el Visor de Escenarios de Cambio Climático ofrece una oportunidad sin precedente para nuestra región*”

logía para nuestros países; además, la mejora en la resolución espacial permitirá realizar escenarios de riesgo a escala regional, nacional y local, es decir, **la información del visor centroamericano de escenarios de cambio climático tiene el potencial de guiar los planes o estrategias de adaptación al cambio climático** desde la escala regional hasta la escala de departamentos o municipios. Esta información también permitirá la articulación de estrategias o planes de adaptación al cambio climático sectoriales o multisectoriales.

Es importante reconocer que **para adaptarnos al cambio climático debemos hacer esfuerzos multisectoriales articulados** y el visor centroamericano contribuye con información para este fin. El visor es gestionado por los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos de la región SICA, ojalá que podamos aprovechar este esfuerzo científico de trabajar con información homologada para Centroamérica y que está disponible para ser utilizada como insumo en las comunicaciones nacionales y en los planes de adaptación de la región, de los países y de las comunidades centroamericanas.

Berta Alicia Olmedo Vernaza  
Sistema de Integración Centroamericana





## Prólogo de la Dirección General de Asociaciones Internacionales

### Horst Pilger

Jefe de Sector

Nuestro marco común para afrontar el cambio climático, establecido en el “Acuerdo de París”, establece la necesidad de diseñar, desarrollar e implementar medidas de mitigación —reducción de emisiones—, así como de adaptación frente a los efectos que los cambios en el clima están provocando ya en los territorios de todo el planeta. Para abordar este segundo objetivo, los Gobiernos firmantes (partes) han acordado: “reforzar la capacidad de las sociedades para afrontar las consecuencias del cambio climático; y ofrecer a los países en desarrollo una ayuda internacional a la adaptación mejor y más constante”.

La Unión Europea está comprometida no solamente con los objetivos de reducción de emisiones para la mitigación de la inestabilidad del sistema climático, sino también con el fortalecimiento de la resiliencia de los países miembros ante los efectos que ya se han comenzado a manifestar, y que nos acompañarán en la transición hacia ese futuro de sostenibilidad y prosperidad hacia el que nos queremos encaminar. Es esta visión del doble carácter del desafío climático la que se traslada al programa EUROCLIMA+, y **es especialmente la atención hacia medidas de adaptación la que impulsa el trabajo que se recoge en este nuevo Estudio Temático** que presentamos aquí: proporcionar herramientas que permitan a nuestros países socios anticiparse a las transformaciones que van a sufrir

sus ecosistemas, para poder diseñar planes de actuación más adecuados a los contextos locales.

Con este objetivo de mejorar las políticas y medidas de adaptación al cambio climático se considera de vital importancia **contar con información científica de calidad**. En este sentido, EUROCLIMA+, a solicitud de los países socios de la región, colabora con los gobiernos para fortalecer los servicios climáticos y los sistemas nacionales o regionales de generación y gestión de la información en la que se sustentan, lo cual se aborda con la mejora de los datos climáticos y de las proyecciones del clima futuro elaboradas a partir de los mismos. De esta manera, estas proyecciones podrán ser utilizadas para avanzar en la comprensión de los impactos climáticos en sus ámbitos respectivos, y anticiparse a sus efectos. Es importante considerar que el **libre acceso y puesta a disposición de esta información** a través de herramientas adaptadas a las necesidades de los interesados, constituye una prioridad fundamental para que, entre todas, avancemos hacia un futuro resiliente al clima.

Una de las acciones que el Programa está apoyando en este campo es la “Generación de Escenarios Climáticos Regionalizados para Centroamérica”, que promueve la colaboración entre países de la subregión centroamericana a través del desarrollo de **proyecciones del clima futuro con una**

“*Proporcionar herramientas que permitan a nuestros países socios anticiparse a las transformaciones que van a sufrir sus ecosistemas*”

**metodología similar**, lo que permitirá realizar análisis detallados de sus impactos bajo una misma lupa en los 6 países participantes en la acción: Guatemala, El Salvador, Honduras, Costa Rica, Nicaragua y Panamá. Para ello, y a petición de los países, se está apostando por el **fortalecimiento de los servicios meteorológicos nacionales** y la mayor vinculación con los Ministerios de Medio Ambiente y sectoriales encargados del diseño de las políticas y medidas de adaptación.

Este Estudio Temático, pone en relieve la importancia de contar con **escenarios regionalizados en ámbitos geográficos concretos** y presenta la experiencia desarrollada en Centroamérica en el marco del Programa EUROCLIMA+, una acción pionera con posibilidad de replicarse en otras subregiones de América Latina.

Espero que el trabajo presentado aquí pueda servir para valorar la importancia de los escenarios climáticos regionalizados en las planificaciones nacionales de adaptación, así como de inspiración para otros procesos que se estén iniciando en la senda de reforzar su conocimiento de las posibilidades que se abren en un futuro climático altamente inestable.

Horst Pilger

Dirección General de Asociaciones Internacionales.  
Comisión Europea





## Prólogo de FIIAPP

### Anna Terrón Cusí

Directora de la Fundación Internacional y para Iberoamérica de Administración y Políticas Públicas

Crear **escenarios regionales** climáticos entre las distintas agencias meteorológicas nacionales puede cambiar vidas. Significa mucho más que mejorar las proyecciones climáticas: es clave para desarrollar las **políticas de adaptación** necesarias para reducir el impacto de los cambios climáticos sobre las personas. Y esto es algo especialmente relevante en Centroamérica, ya que, por su ubicación geográfica entre dos océanos y su situación económica y social, es una de las regiones con mayor vulnerabilidad y riesgo ante la variabilidad climática y el cambio climático.

Este nuevo Estudio Temático del programa EUROCLIMA+, programa insignia de la Unión Europea en materia de cambio climático, pretende facilitar **herramientas que permitan la generación y visualización de escenarios climáticos a escala local**. Un proyecto en el que hemos contado con la inestimable cooperación de la **Agencia Estatal de Meteorología española (AEMET)** y que fomenta también **la cooperación entre los países participantes**, estableciendo marcos de trabajo conjuntos para el aprendizaje entre pares y homologando sistemas de información que podrán ser compartidos. Este tipo de cooperación pública es una prueba más de las consecuencias positivas

que para las personas y el planeta puede tener, y de hecho tiene, la movilización del *expertise* público: compartir experiencias entre administraciones homólogas no solo es eficiente para gestionar el conocimiento colectivo, sino que engrasa las cadenas de una cooperación multilateral imprescindible para afrontar retos que ya no entienden de fronteras, como es el del clima.

En la Fundación Internacional y para Iberoamérica de Administración y Políticas Públicas (FIIAPP), institución pública de cooperación española, trabajamos por el diseño, desarrollo e implementación de políticas públicas para la cohesión social con un enfoque particular, nuestro #FIIAPPway, basado en la **cooperación entre homólogos, la transferencia de conocimiento y de *expertise* entre instituciones y administraciones públicas**. En el marco de EUROCLIMA+, desde la **FIIAPP aportamos nuestra experiencia en gobernanza**, apoyando a los países socios en el desarrollo de políticas climáticas. Movidos por el espíritu de **cooperación entre la Unión Europea y América Latina desde un enfoque horizontal, a través del diálogo y del intercambio**, en la FIIAPP hemos venido acompañando procesos nacionales orientados a la reducción de emisiones,

“*Este estudio pretende facilitar herramientas que permitan la generación y visualización de escenarios climáticos a escala local*”

pero también a la adaptación de los países a los efectos que el cambio climático está generando ya en sus distintas realidades.

Dotarnos de herramientas de diagnóstico, análisis, previsión y anticipación se está revelando clave para poder abordar con criterio y con arreglo a las perspectivas que nos facilita la ciencia climática, las adaptaciones que cada sector requerirá para su supervivencia, tanto en el ámbito socioeconómico (sector productivo, protección civil o infraestructuras) como el de los propios sistemas ecológicos.

El acompañamiento que nos ha brindado la Agencia Estatal de Meteorología de España ha permitido desplegar tecnologías y conocimientos ya probados en otros contextos con gran agilidad y con notable éxito. Se trata de un modelo de cooperación, en definitiva, que optimiza recursos, que fortalece las relaciones entre regiones y países y que permite avanzar en una misma dirección: mejorar los sistemas públicos para las personas y el planeta.

Anna Terrón Cusí  
FIIAPP



La necesidad de adaptación a los impactos que produce el cambio climático requiere la evaluación de los mismos en ecosistemas y sectores afectados por las condiciones climáticas

# 1. Introducción

El **Acuerdo de París, adoptado en la Conferencia sobre el Clima de París (COP21)** en diciembre de 2015, establece un marco global para evitar un cambio climático peligroso manteniendo el calentamiento global **muy por debajo de los 2 °C y prosiguiendo los esfuerzos para limitarlo a 1,5 °C** (véase el texto íntegro del mismo en: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/l09s.pdf>). El Acuerdo también aspira a reforzar la capacidad de los países para hacer frente a los efectos del cambio climático y a apoyarlos en sus esfuerzos. El Acuerdo de París es el primer acuerdo universal y jurídicamente vinculante sobre el cambio climático.

En su artículo 7 el **Acuerdo de París identifica el estudio de los impactos del cambio climático y las medidas de adaptación**, fortalecimiento de la resiliencia y reducción de la vulnerabilidad al mismo como un compromiso nacional, con el objetivo adicional de contribuir al desarrollo sostenible. Menciona, además, que la labor de adaptación debería llevarse a cabo mediante un enfoque que deje el control en manos de los países, de forma que estos emprendan procesos de planificación de la adaptación y adopten medidas, como la formulación o mejora de los planes, políticas o contribuciones pertinentes. Cada país deberá presentar y actualizar periódicamente una comunicación sobre adaptación, que podrá incluir sus prioridades, sus necesidades de aplicación y apoyo, sus planes y sus medidas.

La consecución del objetivo de adaptación que aparece recogido en el artículo 7 del Acuerdo de París fomenta el **desarrollo de los Planes Nacionales de Adaptación al Cambio Climático y, en consecuencia, la importancia**

**de disponer a nivel nacional de escenarios climáticos o proyecciones regionalizadas.**

Asimismo, cada parte deberá presentar y actualizar periódicamente una comunicación sobre adaptación, que podrá incluir sus planes y medidas, sin que ello suponga una carga adicional para las partes que son países en desarrollo. También, se reconoce la importancia de la cooperación internacional y de que se tomen en consideración las necesidades de las partes que son países en desarrollo, en especial, aquellos que son particularmente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático.

La necesidad de adaptación a los impactos que produce el cambio climático requiere la evaluación de los mismos en ecosistemas y sectores afectados por las condiciones climáticas. Por lo tanto, es **necesario conocer el estado del clima futuro en su misma escala espacial**. Los modelos globales del clima proporcionan proyecciones del clima futuro a una resolución espacial (100 o 200 km) que no resulta adecuada para este propósito, por lo que, es **necesario aumentarla mediante técnicas denominadas de regionalización o de reducción de escala**.

Los **servicios meteorológicos tienen la responsabilidad, en la mayoría de los países, de preparar escenarios regionalizados de cambio climático** que, además de su prescriptiva inclusión en las comunicaciones nacionales sobre el cambio climático para la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), son un requerimiento para los estudios de impacto y la definición de estrategias de adaptación en los diferentes ecosistemas y sectores de actividad sensibles a las condiciones climáticas.

La acción “Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para Centroamérica” se desarrolla en Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Panamá y Costa Rica



## 2. Presentación del estudio

El taller intersectorial organizado en diciembre de 2016 por las **tres redes iberoamericanas de meteorología (Conferencia de Directores de Servicios los Meteorológicos e Hidrológicos Iberoamericanos, CIMHET), agua (Conferencia de Directores Iberoamericanos del Agua, CODIA) y cambio climático (Red Iberoamericana de Oficinas de Cambio Climático, RIOCC)** sobre “Prevención y Gestión de Fenómenos Hidrometeorológicos Extremos y Medidas de Adaptación al Cambio Climático” (diciembre 2016) acordó una propuesta de **acción enfocada a la generación de escenarios climáticos regionales para América Central** y el Caribe a partir de los modelos del Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC. Estos escenarios regionalizados deberían poseer una resolución suficiente para evaluar el impacto en los recursos hídricos y fenómenos hidrometeorológicos extremos, deberían desarrollarse utilizando metodologías comunes para toda la región y deberían ser elaborados por instituciones oficiales. Además los escenarios regionalizados servirían para los estudios de impacto al cambio climático y el desarrollo de medidas de adaptación en otros sectores —tal y como se prescribe en el Acuerdo de París— y proporcionarían la información que se requiere para las comunicaciones nacionales a la CMNUCC. La generación de escenarios se complementaría con el desarrollo de un visor amigable para explorar, analizar y acceder a proyecciones regionalizadas de cambio climático sobre la región. Hasta ese momento, estos países habían utilizado únicamente unas pocas regionalizaciones de los modelos globales utilizados en

el AR5 del IPCC, mientras que cada vez resultaba más imperativo —tal y como les empezaban a solicitar sus gobiernos— que generasen escenarios con mayor resolución espacial y utilizando un mayor número de modelos, de escenarios de emisión y de técnicas de regionalización para una mejor exploración de las fuentes de incertidumbre que afectan a las proyecciones regionalizadas.

Por otra parte, desde el 2010, con base en los acuerdos de la V Cumbre de la Unión Europea con América Latina y el Caribe (EU-LAC, de sus siglas en inglés), celebrada en Lima en mayo de 2008, América Latina y Europa habían trabajado conjuntamente frente al cambio climático a través del programa EUROCLIMA, que tiene su continuación y ampliación en el programa EUROCLIMA+ ([www.euroclimaplus.org](http://www.euroclimaplus.org)) financiado por la Unión Europea. EUROCLIMA+ es un programa regional de cooperación delegada de la Unión Europea para apoyar la sostenibilidad ambiental y las medidas de mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático en 18 países de América Latina. EUROCLIMA+ ofrece una amplia gama de servicios especializados orientados a apoyar la implementación de los compromisos del Acuerdo de París en el ámbito de la gobernanza climática, de la financiación y la asistencia técnica para la ejecución de proyectos con los países latinoamericanos en: bosques, biodiversidad y ecosistemas; eficiencia energética; gestión del agua con una perspectiva de resiliencia urbana; gestión y reducción del riesgo de desastres; movilidad urbana; y producción resiliente de alimentos.

Con el fin de mejorar sus servicios climáticos, los 6 países centroamericanos (Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Panamá y Costa Rica) solicitaron apoyo a EUROCLIMA+ para la generación de escenarios climáticos regionalizados con una resolución adecuada para tener en cuenta la heterogeneidad climática de la región y que permitiera la toma de decisiones sobre futuros impactos del clima, incluyendo la planificación de las medidas de adaptación necesarias, en línea con la propuesta de acción acordada por las tres redes iberoamericanas de meteorología, agua y cambio climático en el taller de diciembre de 2016.

Con el objeto de responder a estas necesidades, se puso en marcha, **dentro del programa EUROCLIMA+, la acción “Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para Centroamérica”**. Esta acción tenía **tres objetivos principales:**

- **Producción de escenarios regionalizados** de cambio climático para la región Centroamericana por distintos métodos junto con la documentación asociada.
- **Capacitación y formación** necesaria para producir dichos escenarios.

- Desarrollo de una **herramienta de visualización** para un manejo y descarga amigable de los datos de escenarios regionalizados.

Para conseguir estos objetivos, se tomó la decisión de reproducir, para Centroamérica, el enfoque seguido por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para la generación de proyecciones de cambio climático (Amblar *et al.* 2018) y desarrollar un visor de escenarios climáticos constituido por una plataforma web —similar a la de AdapteCCa (<http://escenarios.adaptecca.es/>) desarrollado para España— que proporcionara una fácil visualización de las proyecciones regionalizadas tanto en forma de mapas y de gráficos de series temporales, como en forma de datos numéricos descargables.

En este estudio temático se abordarán, tras la introducción a los conceptos básicos que incluye una descripción de los métodos de regionalización (Capítulo 3), las herramientas de visualización y archivo de proyecciones regionalizadas, incluyendo una descripción del visor desarrollado en el marco de la acción (Capítulo 4). Finalmente, se incluye un resumen de buenas prácticas en el uso e interpretación de los datos del visor (Capítulo 5) y una breve descripción del procedimiento de generación de servicios climáticos basados en proyecciones regionalizadas de cambio climático (Capítulo 6).



© Shutterstock



El cambio climático se identifica con un cambio en el estado medio del sistema y/o en la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante largos períodos de tiempo

# 3. Conceptos básicos

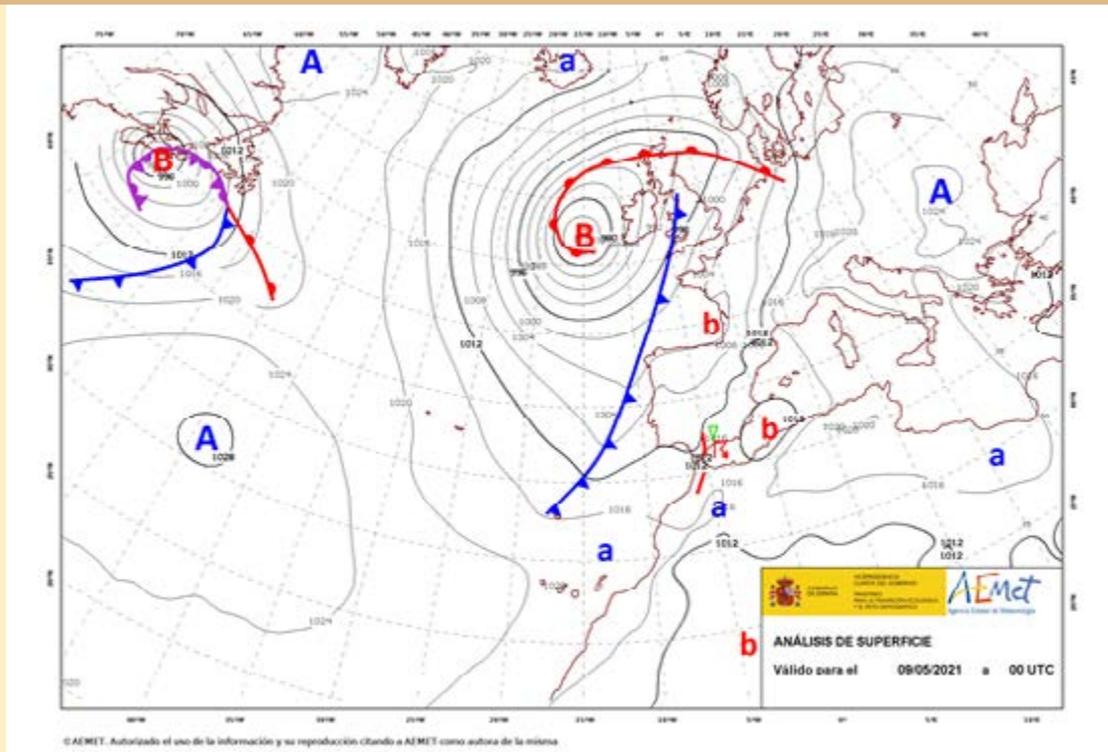
## 3.1. Tiempo y clima

Uno de los aspectos más destacados del tiempo meteorológico y del clima es su variabilidad. El **tiempo meteorológico es la descripción de las condiciones atmosféricas**, como temperatura, viento, lluvia, etc., **en una determinada localidad y en un momento dado**. Varía según

la época del año y muestra cambios más o menos marcados según la latitud, la proximidad al mar o la altitud. Los mapas sinópticos permiten visualizar el tiempo meteorológico en un instante determinado (Figura 3.1).

Figura 3.1.

Representación del tiempo como estado de la atmósfera en un momento dado y para una región determinada mediante un mapa sinóptico



Fuente: AEMET

El **clima de un lugar o región se define como el estado promedio del tiempo** y, más formalmente, como una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años. El período promedio habitual es de 30 años, según las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, WMO). Las magnitudes empleadas son casi siempre variables de superficie como la temperatura, la precipitación o el viento. En un sentido más amplio, el clima es la descripción estadística del estado del sistema climático, de sus componentes, la atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera, y de las interacciones entre ellas. El clima varía en todas las escalas de tiempo: intraanual, interanual, decenal, secular, etc. El concepto de clima hace referencia a escalas temporales superiores a las asociadas a la meteorología y el clima medio de una localidad o región y se refiere al promedio de toda la sucesión de estados meteorológicos (Figura 3.2). **El concepto de variabilidad climática hace referencia a las desviaciones respecto a ese estado medio**, que tienen su máxima expresión en la ocurrencia de extremos.

Desde un punto de vista probabilista, la **variabilidad se representa por la anchura de la distribución de probabilidad** de una determinada variable (p. ej. la desviación típica) y los extremos se caracterizan por la forma de las colas de la distribución. La variabilidad climática puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático o a variaciones de forzamiento<sup>1</sup> externo natural o antropogénico. La variabi-

1 Se entiende por **forzamiento climático** cualquier mecanismo o factor que genera cambios en la energía neta que entra en el sistema climático. Todos los forzamientos climáticos se pueden expresar, por tanto, en términos de un forzamiento radiativo, entendido como un cambio instantáneo en el flujo radiativo (suma de la radiación de onda corta entrante y la larga saliente en el tope de la atmósfera, en  $Wm^{-2}$ ). Cualquier cambio en el balance radiativo redundará en cambios en la temperatura de equilibrio del planeta y contribuye a la variabilidad y al cambio climático.

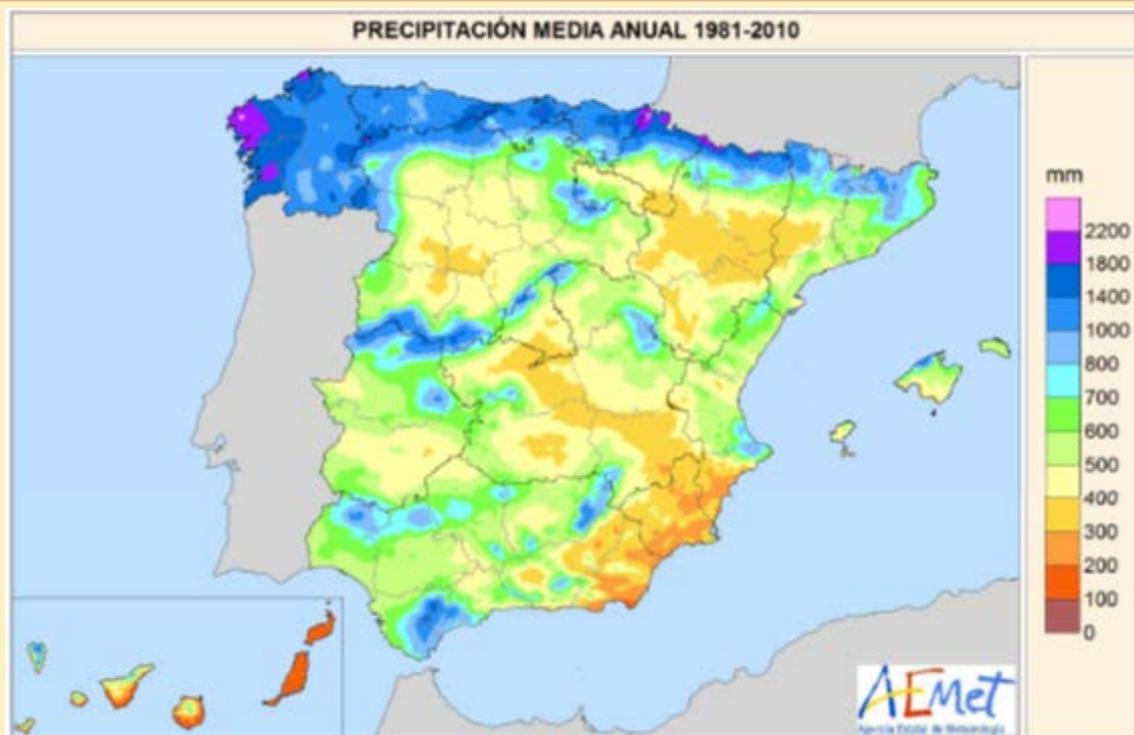
lidad natural puede ser interna (ruido natural) o externa. La interna está asociada a la naturaleza caótica del sistema climático, debida a la presencia de procesos no lineales en cada subsistema, a la existencia de constantes de tiempo físicas diferentes y al modo en que los diferentes subsistemas se acoplan. La variabilidad externa es el resultado de forzamientos externos de origen natural (señal natural), como son los cambios en los parámetros orbitales de la Tierra, cambios en el forzamiento solar o las erupciones volcánicas. El forzamiento externo natural se superpone al ruido natural e interacciona con él.

La variabilidad climática también puede responder a causas externas no naturales, antropogénicas. Esta variabilidad es debida a la respuesta a las actividades de origen humano, como la perturbación del efecto invernadero por la emisión de gases de efecto invernadero o la alteración de las propiedades físicas de la superficie por cambios en los usos y cobertura del terreno.

Es importante distinguir entre variabilidad climática y cambio climático. El **cambio climático se identifica con un cambio en el estado medio del sistema y/o en la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante largos períodos de tiempo**, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático siempre está relacionado con una alteración del equilibrio energético del planeta, bien debida a cambios en el forzamiento externo que originan cambios en la energía extraterrestre que entra en el sistema, o bien debida a cambios internos o externos que modifican el albedo superficial o la composición química de la atmósfera, alterando así la energía saliente. A lo largo de la historia de la Tierra ha habido múltiples cambios climáticos. La Figura 3.3 ilustra esquemáticamente los conceptos de variabilidad climática y cambio climático. La variabilidad se representa como fluctuaciones alrededor de la evolución media, calculada promediando en un periodo de referencia. Si la evolución media presenta variaciones persistentes en periodos largos tenemos, adicionalmente, cambio climático.

Figura 3.2.

**Representación del clima mediante la precipitación acumulada media anual calculada en el periodo 1981-2010**



Fuente: AEMET

Además, también es importante **dilucidar cuándo determinados eventos son atribuibles al cambio climático o, por el contrario, son un reflejo de la variabilidad climática**. Las tendencias del calentamiento global son generalmente más evidentes cuando se hacen promedios globales de temperatura que cuando se consideran series de temperatura local. Esto se debe, principalmente, a que la variabilidad interna del clima local se elimina en gran parte cuando se promedia para obtener la temperatura global. A escala regional la variabilidad interna cobra importancia de modo que la diferenciación entre la respuesta al forzamiento externo y la variabilidad interna puede ser más evidente en unas regiones que en otras y, por tanto, el cambio de temperatura local necesario para poder detectarlo, menor (Rodríguez Camino *et al.* 2018).

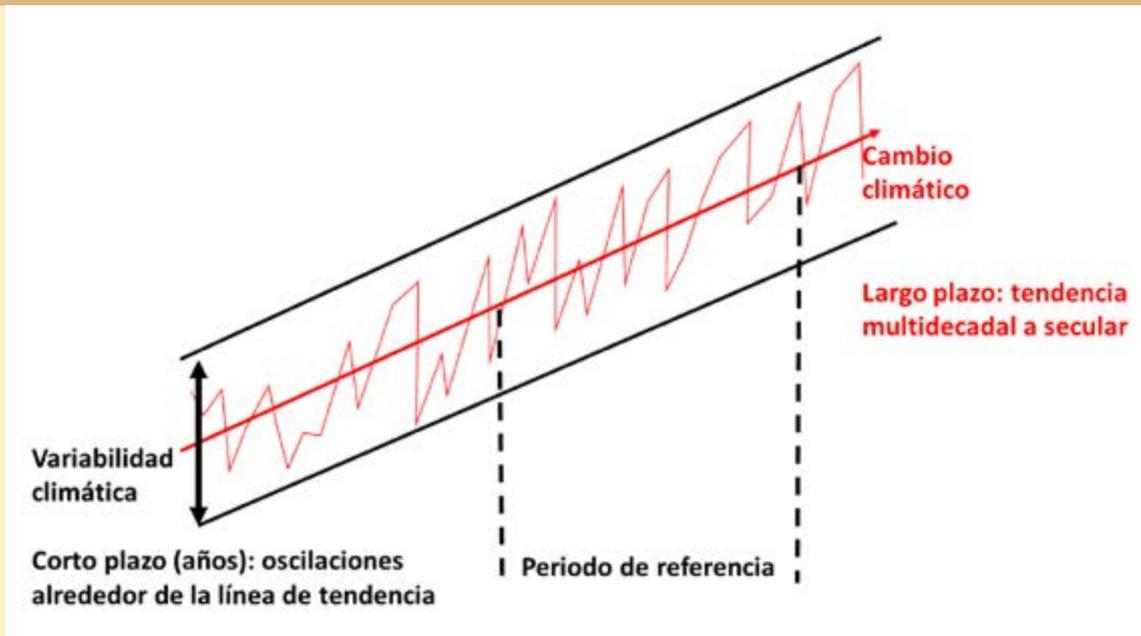
### 3.2. Incertidumbres en las proyecciones de cambio climático

La naturaleza caótica del sistema climático viene determinada por su evolución fuertemente dependiente de las condiciones iniciales, por lo que se precisan múltiples realizaciones para estimar la evolución del mismo. Las **múltiples simulaciones (o ensembles) exploran la incertidumbre proveniente del forzamiento externo, de la variabilidad natural, de los modelos climáticos, de las técnicas de regionalización o de los modelos de impacto** (véase Figura. 3.4).

Estas **incertidumbres se pueden describir en forma jerárquica** o de cascada (Mitchell y Hulme, 1999), de tal forma que cada paso conducente a la generación de proyecciones regionales hereda todas las incertidumbres de los pasos anteriores tal y como se representan en la Figura 3.5.

Figura 3.3.

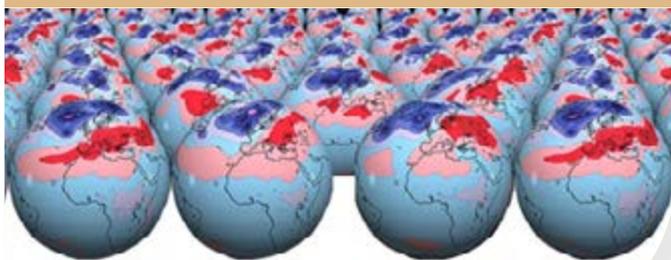
**Esquema de los conceptos de variabilidad y cambio climáticos**



**Fuente:** Rodríguez Camino *et al.* 2018

Figura 3.4.

**El sistema climático es un sistema caótico y la simulación de su evolución está afectada por diferentes fuentes de incertidumbre que requieren de multiplicidad de simulaciones con diferentes forzamientos externos, diferentes modelos, diferentes condiciones iniciales, etc.**



**Fuente:** elaboración propia

En primer lugar, se sitúan las incertidumbres asociadas a los cambios en las condiciones de contorno del sistema climático, que se refieren a las condiciones de origen natural y a la evolución futura de la sociedad y los forzamientos antropogénicos asociados a ella (p. ej., emisiones de gases

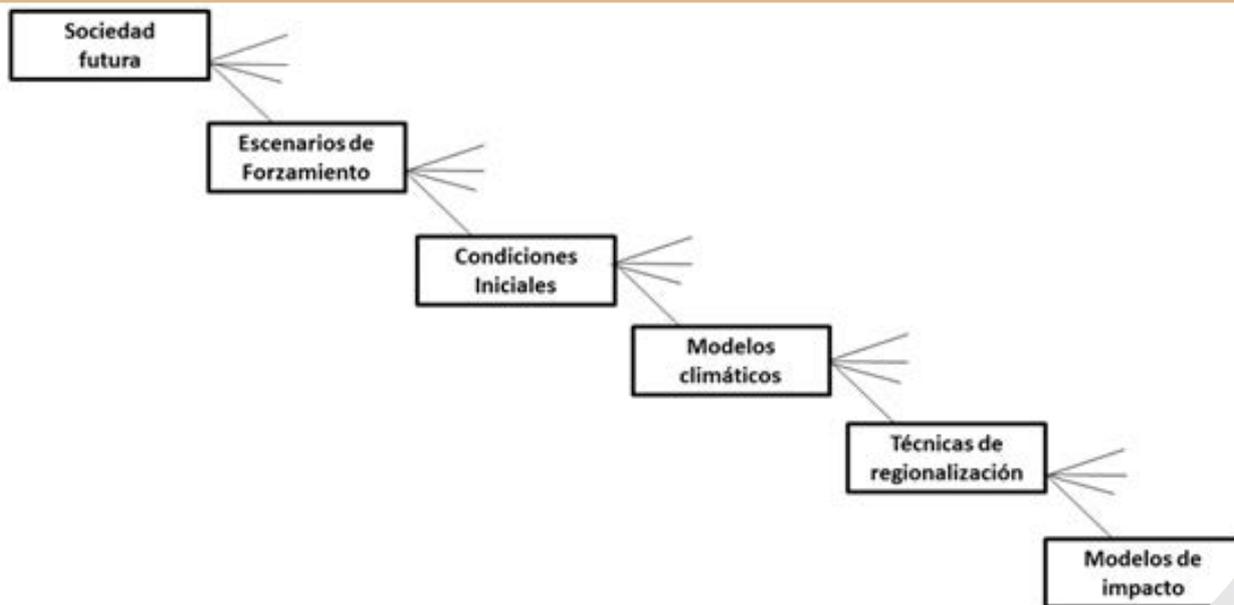
de efecto invernadero y de aerosoles antropogénicos y cambios de uso de suelo). Como la evolución futura de la sociedad no es predecible, al menos según los modelos fisicomatemáticos que simulan los procesos del sistema climático, se recurre a utilizar una serie de escenarios plausibles de evolución futura de los anteriores factores de tipo socioeconómico (Brunet *et al.* 2008). Las sucesivas fuentes de incertidumbres van ampliando el abanico de posibles evoluciones futuras del clima.

**Incertidumbres en los forzamientos naturales**

En el vértice superior de todas las incertidumbres se sitúan los forzamientos externos de tipo natural. Entre estos se pueden mencionar los **cambios en la radiación solar** que llega al tope de la atmósfera (véase Figura 3.6) y las emisiones de aerosoles sulfurosos procedentes de las **grandes erupciones volcánicas** que alcanzan la estratosfera y tienen un tiempo de permanencia de unos pocos años (véase Figura 3.7). Este último efecto se manifiesta principalmente como un aumento de la reflexión de la radiación solar in-

Figura 3.5.

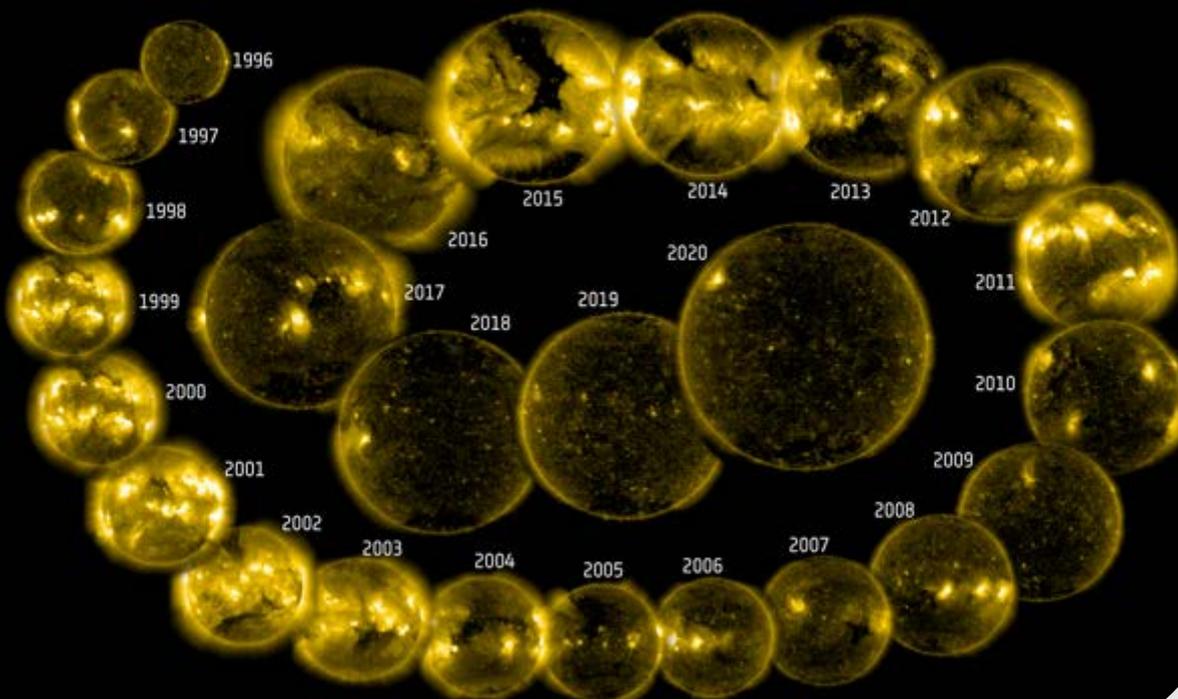
Conjunto de incertidumbres que afectan a las proyecciones de cambio climático en forma jerárquica o de cascada



Fuente: Mitchell y Hulme, 1999

Figura 3.6.

El satélite SOHO de la ESA/NASA ha estado observando el Sol durante 25 años. En ese tiempo, ha observado dos de los ciclos de manchas solares de 11 años del Sol, en los que la actividad solar —y por lo tanto la radiación que llega al tope de la atmósfera— aumenta y disminuye

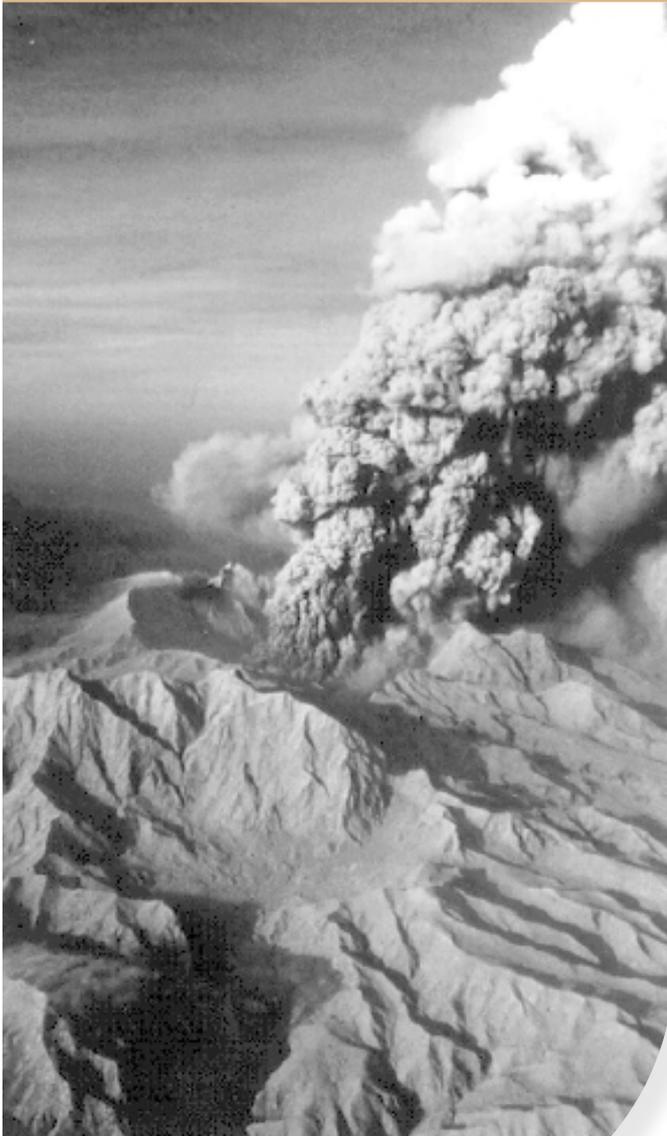


Fuente: SOHO (ESA&NASA), [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/)

cidente y, por lo tanto, constituye un forzamiento radiativo negativo. Los forzamientos naturales se consideran impredecibles y no están contemplados patrones de evolución, al menos en las escalas temporales aquí consideradas. La Figura 3.8 muestra la variación del forzamiento (en  $\text{Wm}^{-2}$ ) asociado a la actividad volcánica y solar considerada para el último milenio.

Figura 3.7.

**Erupción del volcán Pinatubo (15 de junio de 1991) que lanzó a la estratosfera una gran cantidad de aerosoles afectando al forzamiento radiativo y enfriando durante unos pocos años la superficie terrestre**



**Fuente:** United States Geological Survey a través de Wikipedia

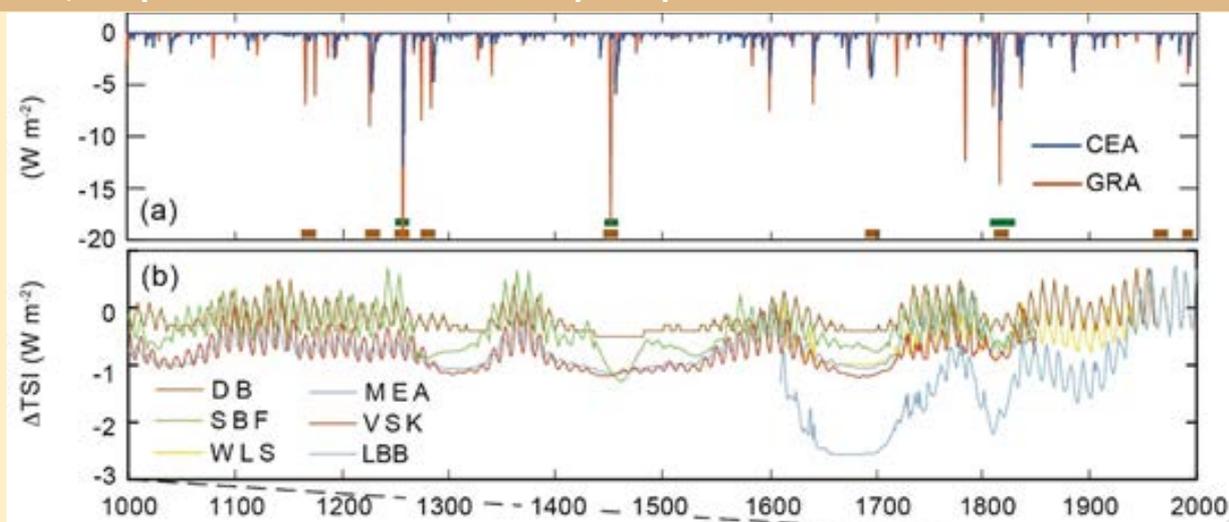
### **Incertidumbres en los forzamientos antropogénicos**

A continuación en la pirámide de las incertidumbres se sitúa la evolución futura de los forzamientos antropogénicos tales como la **emisión de gases de efecto invernadero, de aerosoles y de cambios de usos de suelo** que afectan al forzamiento radiativo en la atmósfera. Obviamente esta evolución futura dependerá de la marcha de la economía, del desarrollo tecnológico, de las fuentes energéticas disponibles y del patrón de consumo energético, de la demografía, etc. y de las decisiones políticas que afecten a la evolución de los anteriores puntos. Como esta evolución no es predecible, al menos según los modelos físico-matemáticos que simulan los procesos del sistema climático, se recurre a utilizar una serie de escenarios plausibles de futura evolución de los anteriores factores de tipo socioeconómico. Para ello se utiliza una colección de escenarios alternativos de evolución de emisiones propuestos por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés).

En el Quinto Informe de Evaluación del Cambio Climático (AR5, de sus siglas en inglés) del IPCC se han definido cuatro nuevos escenarios de emisión, las denominadas **Sendas Representativas de Concentración** (RCP, por sus siglas en inglés). Éstas se **identifican por su forzamiento radiativo total para el año 2100 que varía desde 2,6 a 8,5  $\text{Wm}^{-2}$** . La Tabla 3.1 muestra cuatro escenarios de emisión RCP, su forzamiento radiativo en el año 2100, la tendencia del forzamiento y la concentración de  $\text{CO}_2$  en 2100. Los escenarios de emisión utilizados en el Cuarto Informe de Evaluación (denominados SRES, de sus siglas en inglés) no contemplaban los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales tendentes a mitigar las emisiones, representando posibles evoluciones socioeconómicas sin restricciones en las emisiones. Por el contrario, algunos de los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI.

Figura 3.8.

**Forzamiento (en  $Wm^{-2}$ ) asociado a la actividad volcánica y solar considerado para el último milenio. Los diferentes colores indican estimaciones de diferentes bases de datos disponibles, dos para el forzamiento volcánico y seis para el solar**



Fuente: Stocker *et al.* 2013

Tabla 3.1.

**Características de los cuatro escenarios de emisión RCP incluyendo la tendencia del forzamiento radiativo (FR) y concentración de  $CO_2$  en 2100**

	FR	Tendencia del FR	$[CO_2]$ en 2100
<b>RCP2.6</b>	2,6 $W/m^2$	decreciente en 2100	421 ppm
<b>RCP4.5</b>	4,5 $W/m^2$	estable en 2100	538 ppm
<b>RCP6.0</b>	6,0 $W/m^2$	creciente	670 ppm
<b>RCP8.5</b>	8,5 $W/m^2$	creciente	936 ppm

Fuente: MAGRAMA, 2013

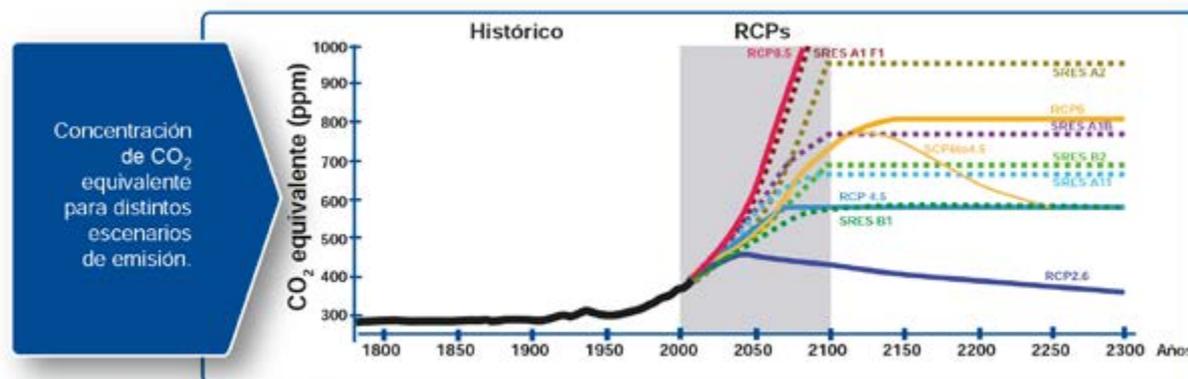
Cada RCP tiene asociada una base de datos de alta resolución espacial de emisiones de sustancias contaminantes (clasificadas por sectores), de emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero y de usos de suelo hasta el año 2100, basada en una combinación de modelos de distinta complejidad de la química atmosférica y del ciclo del carbono (Figura 3.9).

### Incertidumbres en los modelos globales

Las mismas herramientas utilizadas para generar las proyecciones climáticas, es decir, **los modelos**

**climáticos de circulación general muestran también muchas incertidumbres en su nivel actual de desarrollo.** Los diferentes modelos son distintas formulaciones de las ecuaciones que describen los distintos componentes del sistema climático, considerando distintas rejillas, resoluciones, esquemas numéricos, parametrizaciones de procesos físicos, etc. Las simulaciones de cambio climático producidas con distintos modelos climáticos en los mismos escenarios de cambio climático muestran una considerable dispersión, reflejando distintas representaciones de la sensibilidad del clima a cambios en el forzamiento externo

Figura 3.9.

Concentración de CO<sub>2</sub> equivalente para distintos escenarios de emisión

Fuente: MAGRAMA, 2013

(sensibilidad climática), y, por lo tanto, un alto nivel de incertidumbre que depende en gran medida de las regiones, estaciones, variables, etc. La Figura 3.10 muestra la incertidumbre asociada a la diversidad de modelos globales en las proyecciones de temperatura en superficie y nivel del mar. Los mismos procesos simulados por los modelos incluyen incertidumbres. De hecho, la modelización del sistema climático ha ido ganando complejidad y añadiendo componentes adicionales con el paso de los años. Por ejemplo, gran parte de las simulaciones realizadas en los modelos más primitivos suponían que la vegetación era constante en el tiempo y permanecía invariable en simulaciones seculares de cambio climático antropogénico. En la realidad, la vegetación, que lógicamente depende de las condiciones climáticas cambiantes, tiene también capacidad para afectar al clima y, como tal, debería simularse.

### Incertidumbres estructurales

Bajo este epígrafe se incluyen las incertidumbres asociadas a la **incompleta (o total) falta de conocimiento de algún proceso que afecte al sistema climático o cómo modelarlo**. De hecho, las simulaciones del sistema climático se han ido haciendo más complejas al incluir componentes y procesos que en los primitivos modelos no estaban contemplados. Por ejemplo, los primitivos

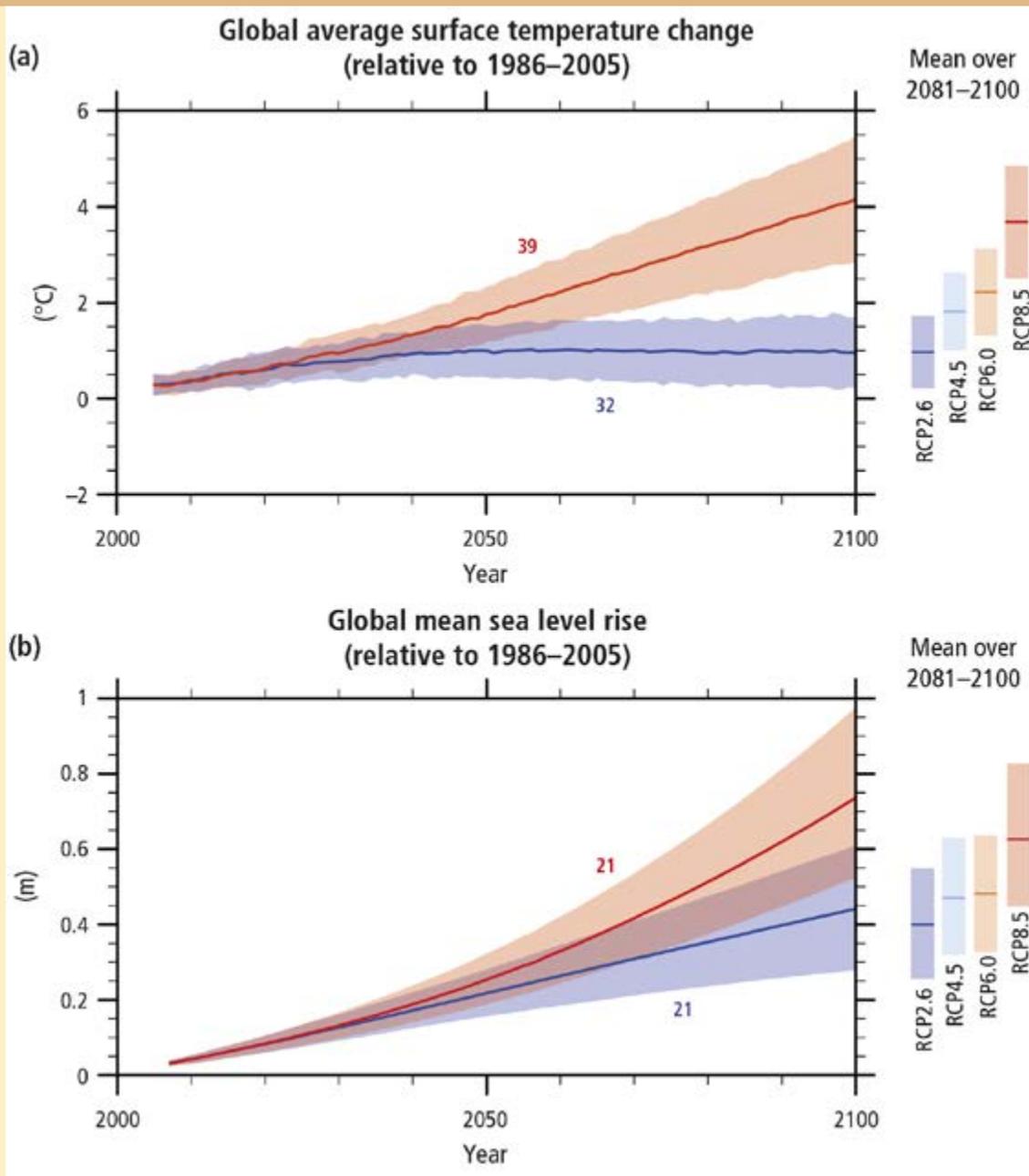
modelos climáticos solo incluían componentes atmosférico y oceánico y los procesos relacionados con la superficie terrestre y la biosfera estaban excluidos de las simulaciones. Solo más recientemente, los modelos han incluido vegetación que evoluciona e interacciona con las condiciones climáticas.

### Incertidumbres en las técnicas de regionalización

Se denomina **regionalización al procedimiento consistente en extraer información de escalas local a regional a partir de modelos o análisis de datos a mayor escala**. Existen básicamente dos métodos: dinámico y empírico/estadístico. El método dinámico está basado en los resultados de modelos climáticos regionales, de modelos globales con resolución espacial variable o de modelos globales de alta resolución. El método empírico/estadístico está basado en el desarrollo de relaciones estadísticas que vinculen las variables atmosféricas de gran escala con las variables climáticas de escala local/regional. En todos los casos, la calidad del modelo utilizado sigue siendo una importante limitación en la calidad de la información a escalas reducidas. Las **distintas técnicas de regionalización (estadísticas y dinámicas) contribuyen a la incertidumbre con fuentes de error adicionales**. Los méto-

Figura 3.10.

Evolución del cambio en a) temperatura media global y b) nivel medio global del mar desde 2006 hasta 2100 obtenida a partir de un *ensemble* multimodelo. Todos los cambios son relativos al periodo 1986-2005. Los valores medios y la incertidumbre (sombreada) se representa para dos escenarios de emisión: RCP2.6 (azul) y RCP8.5 (rojo). Las medias y las incertidumbres asociadas para el periodo 2081-2100 para todos los escenarios se representan como barras verticales a la derecha. Se indica también el número de modelos utilizados del CMIP5 utilizados en el *ensemble*



Fuente: IPCC, 2014

dos estadísticos poseen una limitación específica debida a que las relaciones entre las variables a gran escala y las variables locales no tienen por

qué mantenerse frente a cambios en el clima. De hecho, las relaciones entre ambas variables se establecen en un período relativamente corto obser-

vacional y se prescriben para situaciones futuras que pueden distar bastante en el tiempo. Los métodos dinámicos basados en modelos regionales del clima añaden fuentes de error similares a las de los modelos globales con los que son forzados y algunas específicas a la simulación a escala regional. La incertidumbre en el forzamiento radiativo asociada a la distribución espacio-temporal de aerosoles tiene una relevancia especial a escala regional debido a la heterogeneidad del forzamiento y la respuesta. Otro aspecto que incide de forma importante en estas escalas son las variaciones en los usos de suelo y el realismo en los modelos de suelo. La evaluación de incertidumbres a escala regional se complica adicionalmente por la baja relación de la señal de respuesta frente a la variabilidad climática interna. Este es especialmente el caso de variables, como la precipitación, no directamente relacionadas con el forzamiento externo y cuya estimación en sí misma posee ya unas incertidumbres que dependen de otros factores meteorológicos.

Los modelos de impacto en los diferentes sectores sensibles a las condiciones climáticas (p. ej., sector hidrológico, agrícola, energético, etc.) añaden fuentes adicionales de incertidumbre que hay que estimar y acotar a la hora de determinar los impactos.

### **Incertidumbre por efectos de la variabilidad natural**

Una fuente adicional de incertidumbre en las proyecciones de clima futuro surge como consecuencia de los efectos de la variabilidad natural. Para un cierto período en el futuro (p. ej., 2071-2100), la variabilidad natural puede reforzar el cambio de origen antropogénico o puede contrarrestarlo. Es importante, por lo tanto, considerar la variabilidad en los estudios de impacto y adaptación al cambio climático. Como no se puede predecir la variabilidad natural del clima determinísticamente sobre largas escalas temporales, es razonable hacer uso de un **ensemble de experimentos, cada uno empezando con distintas condiciones iniciales para el sistema océano-atmósfera.**

Los efectos de la variabilidad natural son mayores a medida que la escala temporal disminuye, siendo más importantes en las escalas entre anuales y decenales.

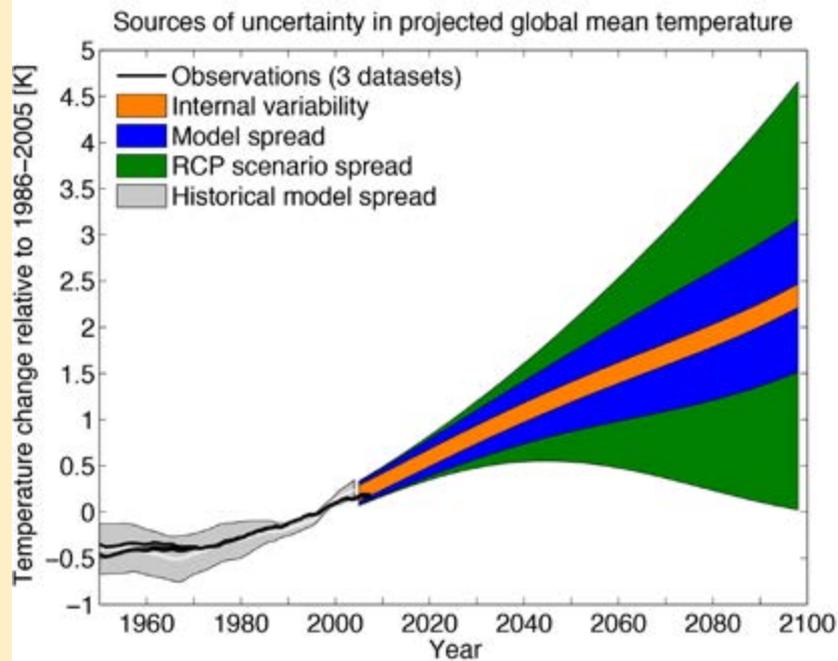
### **Contribución relativa de las diferentes fuentes de incertidumbre**

Como hemos mencionado más arriba, las incertidumbres se pueden describir en forma jerárquica o de cascada, de tal forma que cada paso conducente a la generación de proyecciones regionales hereda todas las incertidumbres de los pasos anteriores. Las sucesivas incertidumbres van abriendo el abanico de posibles evoluciones futuras del clima (Figura 3.11).

La contribución relativa de las diferentes fuentes de incertidumbre depende del alcance de las predicciones y proyecciones climáticas. Si nos restringimos a tres de las principales fuentes de incertidumbre [i) condiciones iniciales, ii) diferentes formas de representar el sistema climático por parte de una colección de modelos climáticos, iii) forzamientos externos], mientras que en la escala estacional las incertidumbres asociadas a las condiciones iniciales y las imperfecciones de los modelos son las que tienen mayor contribución relativa, en la escala decenal y secular la mayor contribución corresponde a las imperfecciones de los modelos y a los diferentes forzamientos externos, siendo el peso de estos últimos, representados por escenarios alternativos de emisiones, el dominante a medida que se aumenta el alcance temporal (Kirtman *et al.* 2013). La Figura 3.12 representa las contribuciones relativas a la incertidumbre en la temperatura media anual global de estas tres fuentes mencionadas. Una vez identificadas las principales fuentes de incertidumbre que afectan a las predicciones/proyecciones climáticas, el siguiente paso es diseñar un *ensemble* de simulaciones con miembros que exploren las incertidumbres conocidas. Algunas incertidumbres no se exploran en los sistemas operativos bien por insuficiencia de conocimiento (p.ej., incertidumbres estructurales o naturales) o por limitaciones técnicas (p.ej., de cálculo).

Figura 3.11.

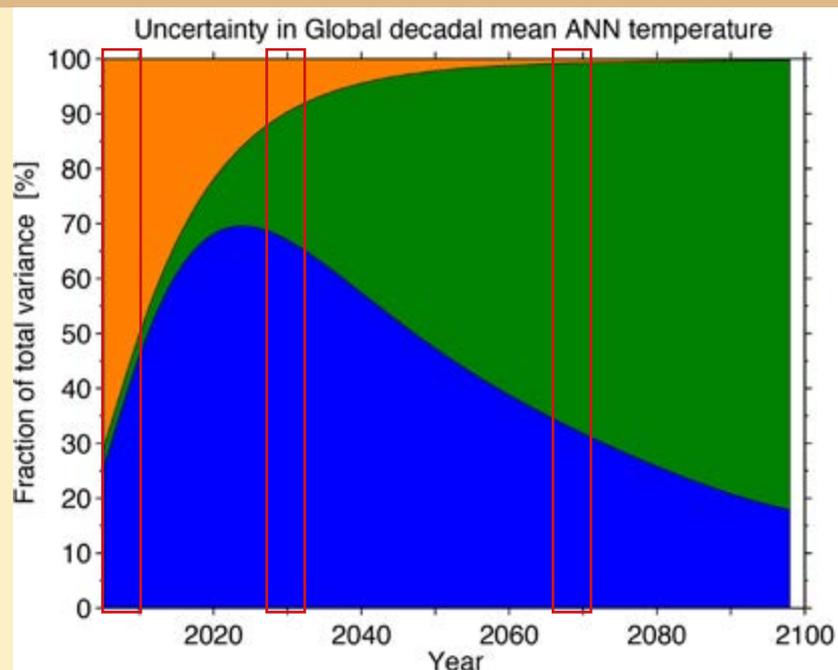
Fuentes de incertidumbre en la simulación climática: condiciones iniciales (naranja), modelos climáticos (azul), escenarios de emisión (verde)



Fuente: Kirtman *et al.* 2013

Figura 3.12.

Contribuciones relativas de tres fuentes de incertidumbre: condiciones iniciales (naranja), modelos climáticos (azul), escenarios de emisión (verde). Los rectángulos en rojo muestran la diferente contribución relativa de las distintas fuentes de incertidumbre para diferentes escalas temporales (véase explicación en el texto)



Fuente: Kirtman *et al.* 2013, modificado

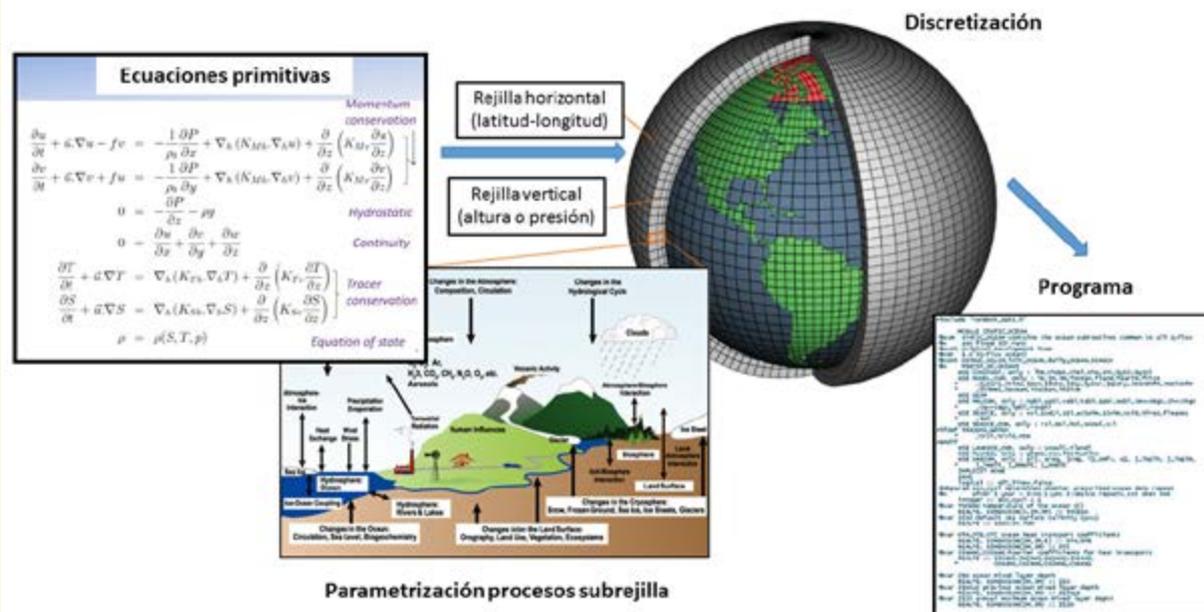
### 3.3. Modelos climáticos

Los modelos climáticos son una de las principales herramientas para analizar y estudiar el clima. Los modelos climáticos son programas informáticos basados en las ecuaciones que describen la evolución de los distintos componentes del sistema climático (atmósfera, océano, hielos, biosfera,...), sus interacciones y sus procesos de retroalimentación (véase esquema en la Figura 3.13). La utilización de modelos, por una parte, nos permite tratar y analizar sistemas que por su complejidad son inabordables. Por otra, la realización de experimentos controlados es consustancial al método científico pero, en general, muy difícil en el ámbito de las ciencias de la Tierra. La sustitución del sistema real por modelos del mismo permite la realización de experimentos por medio de simulaciones numéricas. Ejemplos concretos son la introducción de cambios en las condiciones iniciales o de contorno, incluyendo los forzamientos climáticos, la topografía o la distribución de los continentes.

En el ámbito de la atmósfera y el océano los modelos climáticos que constituyen el estado del arte del conocimiento son los modelos climáticos globales o modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés), tanto atmosféricos (AGCM, por sus siglas en inglés) como oceánicos (OGCM, por sus siglas en inglés). Los GCM simulan la dinámica de la atmósfera y el océano en tres dimensiones a partir de las ecuaciones fundamentales que gobiernan estos sistemas, es decir, de principios físicos fundamentales. Estos son la conservación del momento, la energía y la masa y la ecuación de estado. Cada uno de ellos se expresa mediante una ecuación. Además, se necesitan ecuaciones adicionales para la evolución de la concentración de sustancias características de cada sistema como la humedad en el caso de la atmósfera o la salinidad en el del océano, así como cualquier otra sustancia presente en estos sistemas. Esto nos proporciona un sistema de ecuaciones cerrado, con igual número de ecuaciones que de incógnitas que, en principio, puede resolverse para cualquier instante y punto del espacio. Sin embargo, por contener términos no lineales estas ecuaciones no pue-

Figura 3.13.

#### Representación esquemática de un modelo climático



Fuente: elaboración propia

den resolverse analíticamente. Por esta razón su resolución se lleva a cabo numéricamente reemplazando las ecuaciones continuas, en derivadas parciales, por ecuaciones discretizadas espacial y temporalmente con una resolución determinada y eligiendo un sistema de coordenadas adecuado tanto en la horizontal como en la vertical y esquemas adecuados para resolver numéricamente las ecuaciones (Figura 3.13). Un aspecto importante es que al resolver las ecuaciones se hacen ciertas aproximaciones en estas que simplifican su solución sin que se pierda información relevante desde un punto de vista climático.

La discretización de las ecuaciones fundamentales a una resolución espacio-temporal dada está limitada por la capacidad computacional. La resolución típica de los modelos climáticos ha aumentado en paralelo con el aumento de los recursos computacionales a lo largo del tiempo. Un aspecto muy importante es que a cualquier resolución espacial siempre habrá procesos que el modelo resolverá explícitamente y otros que no, por ocurrir a escalas inferiores a la resolución del modelo. Estos últimos se denominan procesos de submalla o subrejilla, e incluyen multitud de procesos físicos importantes; en el caso de la atmósfera, los procesos radiativos, la turbulencia, la convección, la cubierta de nubes, la microfísica de nubes o el arrastre orográfico. Estos procesos no pueden ignorarse por ser fundamentales desde el punto de vista físico y afectar a los campos resueltos explícitamente por el modelo. Con frecuencia, de hecho, están relacionados con procesos de retorno al equilibrio dinámico o termodinámico, e ignorarlos conduciría a errores en la simulación. Por esta razón es necesario incluirlos, bien en las ecuaciones, bien mediante ajustes adicionales al margen de estas. Esto se lleva a cabo mediante representaciones paramétricas a partir de los campos resueltos o parametrizaciones. La exactitud de las parametrizaciones depende de nuestra comprensión de los procesos físicos subyacentes y determina la calidad de las simulaciones. Por esta razón las parametrizaciones han sido y son objeto de intensa investigación. Nótese que a medida que la resolución espacial de un modelo aumenta existen procesos que, por

sus escalas espaciales características podrán resolverse, con lo que su parametrización deja de ser necesaria. Un ejemplo de ello es la convección, que se parametriza en los modelos de resolución relativamente grosera que utilizan la aproximación de balance hidrostático, pero que se resuelve, al menos en parte, en los modelos de alta resolución no hidrostáticos. Sin embargo, hay otros procesos que incluso a muy alta resolución siempre será necesario parametrizar, como los procesos radiativos, que tienen lugar a escalas espaciales atómicas y moleculares, o la microfísica de nubes, que ocurre a escalas de milímetros a micras.

Los AGCM se desarrollaron a partir de los modelos atmosféricos de predicción numérica del tiempo, adaptados a los objetivos de las simulaciones climáticas. Los AGCM requieren la prescripción de condiciones de contorno así como la inclusión de un modelo de suelo para caracterizar el tipo de suelo, la vegetación, el almacenamiento de agua en forma de humedad, nieve o acuíferos. Esta caracterización es necesaria para poder determinar propiedades como el albedo superficial, la evapotranspiración o la rugosidad, que se utilizan en el cálculo de los flujos de momento, calor y agua intercambiados con la superficie, así como la escorrentía. Mientras que en las simulaciones a corto plazo pueden desprejiciarse las variaciones en las condiciones oceánicas, que por tanto pueden prescribirse como condiciones de contorno para los modelos atmosféricos, las simulaciones a más largo plazo requieren la incorporación de las interacciones entre la atmósfera y el océano. Esto motivó el desarrollo de los modelos oceánicos. Una componente esencial del océano es el hielo marino, que se forma cuando el agua superficial del océano se congela.

La atmósfera, el océano y el hielo marino son esencialmente componentes físicas, descritas por los principios físicos fundamentales mencionados anteriormente. Junto con los modelos de suelo, estas constituyen las componentes básicas de los AOGCM, los modelos que representaban el estado del arte hasta finales de los años 90 (Figura 3.14). Un aspecto importante es que el desarrollo de los modelos es modular, en el sentido de que

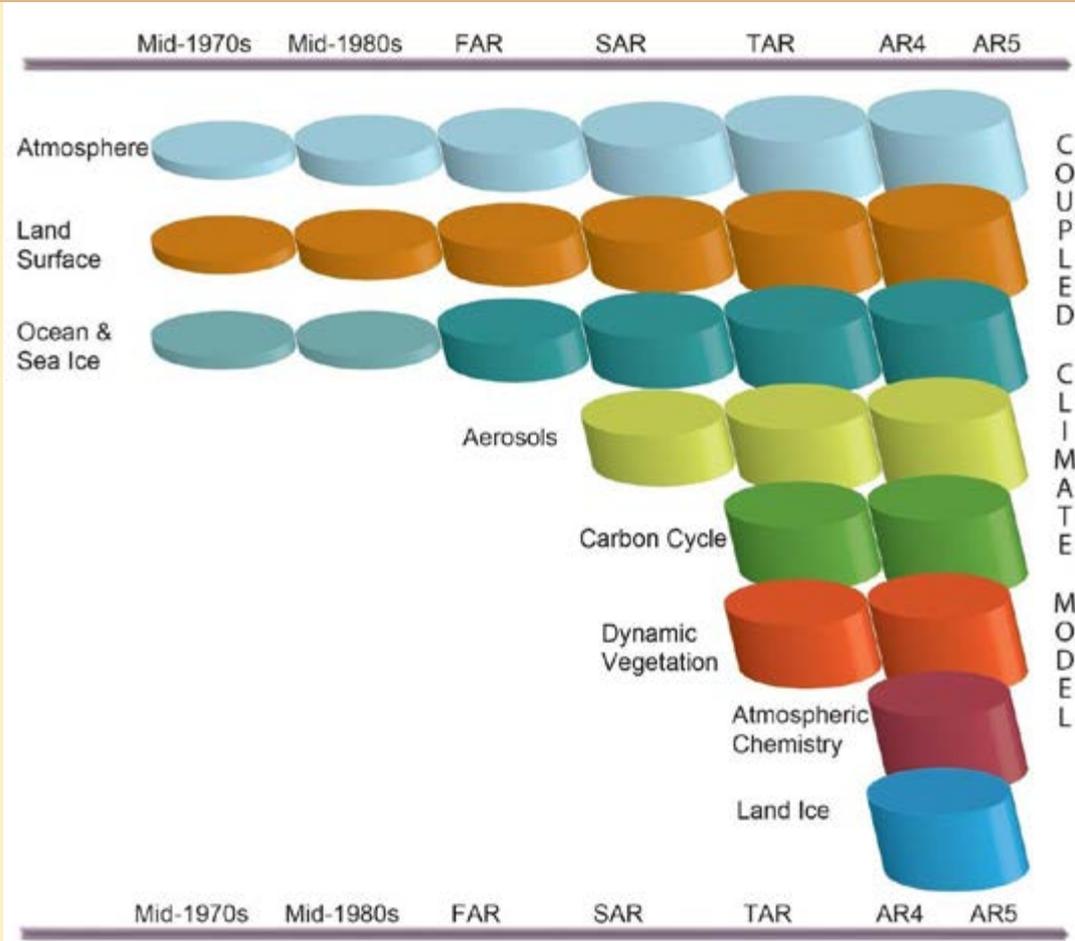
sus componentes se desarrollan por separado para ser finalmente acopladas.

Al igual que ocurrió al pasar de los modelos meramente atmosféricos en estudios a corto plazo a los modelos acoplados de atmósfera y océano para estudios climáticos, a medida que ha aumentado la complejidad de las preguntas científicas, ha surgido la necesidad de aumentar el número de componentes de los modelos climáticos. En general, existe una relación directa entre la escala temporal de interés y el número de componentes del sistema terrestre que deben considerarse (Figura 3.15). En la actualidad se acepta que la comprensión completa del clima involucra a todas las componentes

del sistema terrestre: la atmósfera (no sólo desde el punto de vista físico sino también químico), la litosfera, la biosfera, tanto marina como terrestre y la criosfera. Así, cada vez más modelos tratan de incorporar nuevos procesos y componentes (Figura 3.15). Mientras los AOGCM de los años 70-90 del siglo XX consideraban esencialmente las componentes físicas del sistema terrestre (atmósfera, océano, hielo marino y suelo). Se denominan modelos del sistema terrestre (ESM, de sus siglas en inglés) a los modelos climáticos que también incluyen el ciclo de carbono y las fuentes y sumideros de éste asociados a la biosfera terrestre y la biogeoquímica marina y constituyen las herramientas del estado del arte actual de la simulación climática.

Figura 3.14.

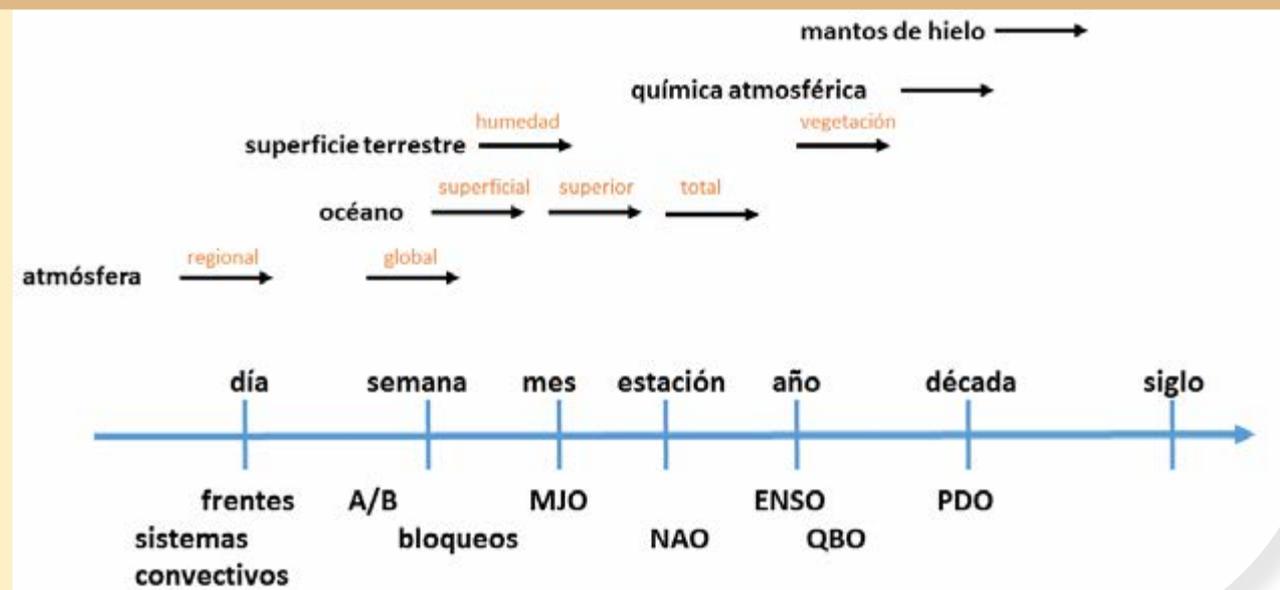
**Evolución temporal del desarrollo de los modelos climáticos. Se muestra la incorporación de nuevas componentes así como el incremento con el tiempo de la complejidad y el rango de los procesos representados, ilustrados por el crecimiento los cilindros**



Fuente: Cubasch *et al.* 2013

Figura 3.15.

Esquema que ilustra las escalas espacio-temporales típicas de los diferentes modos de variabilidad climáticos y la relevancia de diferentes componentes del sistema terrestre a las distintas escalas

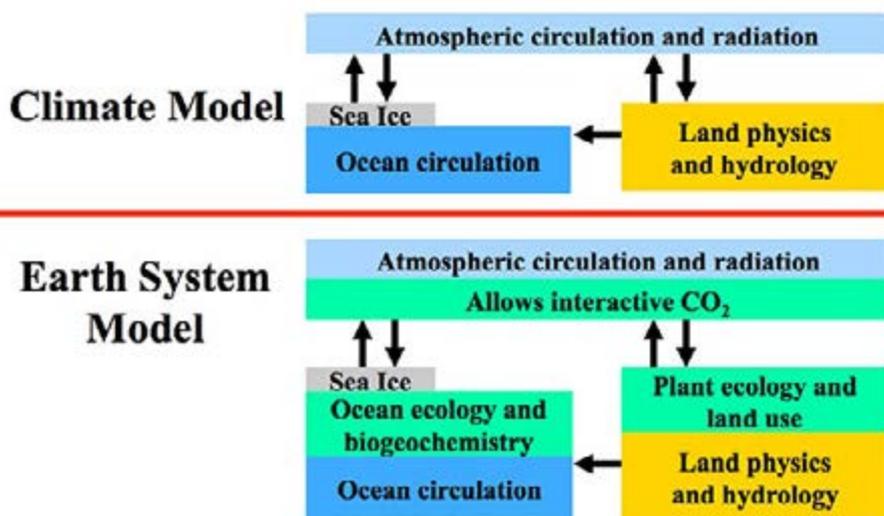


Fuente: elaboración propia

Figura 3.16.

Esquema que ilustra las diferencias entre un modelo climático, que incluye las componentes físicas del sistema climático (atmósfera, océano, hielo marino y suelo) y un modelo del sistema terrestre que en este caso incluye el ciclo de carbono y las fuentes y sumideros de éste asociados a la biosfera terrestre y la biogeoquímica marina

### An Earth System Model (ESM) closes the carbon cycle



Fuente: <https://soccom.princeton.edu/content/what-earth-system-model-esm>

El efecto de los aerosoles es una de las principales fuentes de incertidumbre en los forzamientos radiativos como consecuencia de su muy diferente origen, características y propiedades, así como de la dificultad de caracterizar su interacción con la radiación. Las interacciones entre la química y el clima son esenciales para el estudio de efecto de la creación y recuperación del agujero de la capa de ozono. La química y el cálculo del ozono estratosférico se han incorporado recientemente en algunos modelos. La dinámica estratosférica puede afectar a la circulación troposférica. Por esta razón muchos modelos son capaces, en la actualidad, de resolver la estratosfera. Incluir el ciclo de carbono involucra representar las fuentes y sumideros de carbono en el sistema terrestre y, por tanto, la biogeoquímica terrestre y oceánica. En estos modelos, en su versión más completa y realista, la concentración de CO<sub>2</sub> no viene impuesta externamente sino que se calcula considerando las fuentes y sumideros del sistema, al igual que para cualquier otro gas atmosférico que forme parte de un ciclo cerrado del sistema terrestre, incluyendo las biológicas como la biosfera terrestre y la biogeoquímica marina (Figura 3.16). La vegetación terrestre, además, puede prescribirse, como en los modelos de suelo relativamente sencillos o representarse de modo interactivo mediante modelos dinámicos globales que permiten calcular la evolución dinámica de la cubierta de vegetación, que afecta no sólo al ciclo de carbono sino al cálculo de flujos de calor y humedad. Por último, una componente fundamental del sistema terrestre y que hasta ahora se ha incluido en muy pocos modelos es la componente terrestre de criosfera, que comprende los mantos de hielo de la Antártida y Groenlandia, cuyas variaciones pueden afectar considerablemente al nivel del mar.

Los diferentes modelos climáticos poseen un grado de complejidad variable, esto es, sus diferentes componentes pueden incorporar formulaciones más o menos complejas. Para cualquiera de los componentes del modelo climático existe una jerarquía de modelos que difieren en el número de dimensiones espaciales, resolución, procesos físicos, químicos o biológicos explícitamente repre-

sentados o el diferente nivel de las parametrizaciones empíricas para los procesos no explícitamente resueltos. Un modelo climático es esencialmente una colección de modelos que representan las distintas componentes del sistema climático. Cada componente del modelo representa una cantidad compleja de procesos especializados. Los componentes se desarrollan independientemente y su resultado es un código muy separado, diferente e independiente del resto del código, contrariamente al mundo real, por lo que todos los modelos disponen de un acoplador que armoniza y coordina las integraciones. El acoplador esencialmente pasa datos entre componentes y controla el bucle temporal (Rodríguez Camino *et al.* 2019).

Al estar los modelos climáticos basados en leyes físicas son capaces de representar con razonable precisión los climas pasados, lo que les faculta para su utilización en estimaciones del clima futuro. Los modelos climáticos permiten además investigar los mecanismos que gobiernan el sistema climático, incluidos estudios de atribución de las causas de cambios en el clima. Finalmente, cuando se restringen al componente atmosférico constituyen la herramienta esencial para la predicción del tiempo.

### 3.4. Predicciones y proyecciones climáticas

Una pregunta que surge con frecuencia en el contexto de la simulación numérica del clima, en particular con la realización de proyecciones futuras es: ¿cómo es posible simular el clima a cien años vista si ni siquiera somos capaces de predecir el tiempo con un horizonte de predicción de dos semanas? La respuesta a esta pregunta es que estos dos problemas son de naturaleza diferente: mientras que la predicción del tiempo a corto plazo es un problema de valores iniciales, donde capturar bien las condiciones iniciales es esencial y, por tanto, cualquier desviación con respecto a las condiciones iniciales exactas se traduce en errores que crecen ilimitadamente,

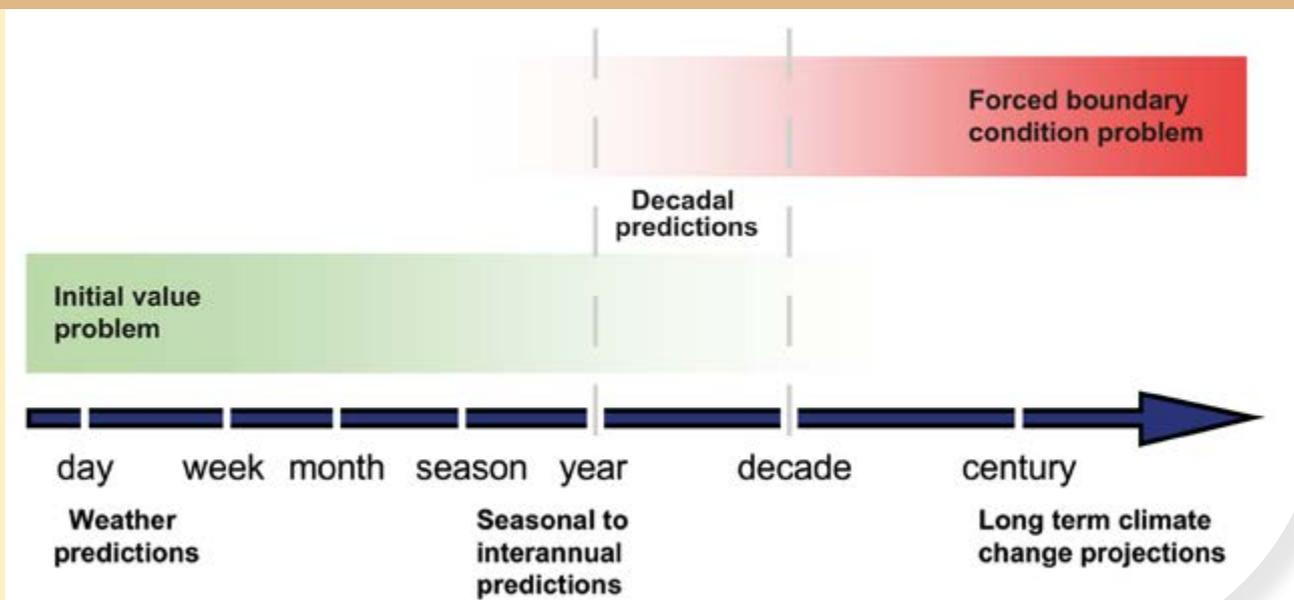
las proyecciones climáticas a largo plazo constituyen un problema de condiciones de contorno, impuestas por los forzamientos —son problemas de predecibilidad distintos—, véase Santos Burguete, 2018. Mientras que las predicciones del tiempo intentan capturar con la mayor fidelidad posible la trayectoria exacta del sistema, las proyecciones simplemente ofrecen una trayectoria plausible de este, compatible con las condiciones de contorno. Entre ambas se encuentran las llamadas predicciones climáticas, donde tanto las condiciones iniciales como las condiciones de contorno son relevantes (Figura 3.17). Un aspecto importante es que aunque los modelos climáticos se desarrollaron a partir de los modelos de predicción numérica del tiempo adaptados para las objetivos y escalas espacio-temporales típicas del clima, en la actualidad se apunta a lo que así se denomina una simulación unificada o sin costuras (en inglés, *seamless*), es decir, la utilización de los mismos modelos para simulación futura a todas las escalas espacio-temporales (Rodríguez Camino *et al.* 2018).

### 3.5. Proyecciones regionalizadas de cambio climático

Los modelos globales de clima proporcionan proyecciones a una resolución espacial (aprox. 100 km) que es claramente insuficiente para su utilización en estudios de impacto al cambio climático que suele realizarse en escalas locales o de pocos o decenas de kilómetros. Se denomina regionalización al método consistente en extraer información de escalas local a regional de modelos o análisis de datos a mayor escala. Existen básicamente dos métodos: dinámico y empírico/estadístico. El método dinámico está basado en los resultados de modelos climáticos regionales, de modelos globales con resolución espacial variable o de modelos globales de alta resolución. El método empírico/estadístico está basado en el desarrollo de relaciones estadísticas que vinculen las variables atmosféricas de gran escala con las variables climáticas de escala local/regional. En todos los casos, la calidad del modelo utilizado sigue siendo una importante

Figura 3.17.

**Esquema que ilustra la progresión desde las predicciones a escalas temporales cortas, que constituyen un problema de valores iniciales, a las proyecciones climáticas, que son problemas de condiciones de contorno forzadas. La predicción decenal ocupa el término medio entre ambos**



Fuente: Kirtman *et al.* 2013

limitación en la calidad de la información a escalas reducidas (IPCC 2014, Glossary).

La regionalización de las simulaciones procedentes de los modelos globales de clima es necesaria para: a) proporcionar variables de superficie (típicamente temperatura y precipitación) adaptadas a las características locales; b) poder estimar extremos que son suavizados por la insuficiente resolución de los modelos globales; c) adaptar la resolución espacio-temporal a la requerida por los modelos de impactos.

Una alternativa a la regionalización es integrar los modelos de clima con mayor resolución espacial pero para ello se necesitan ordenadores más potentes que los actualmente disponibles o simula-

ciones más cortas. Con lo que esta opción no es viable desde un punto de vista práctico. La Figura 3.18 muestra el efecto de una mayor resolución en la topografía de la región europea.

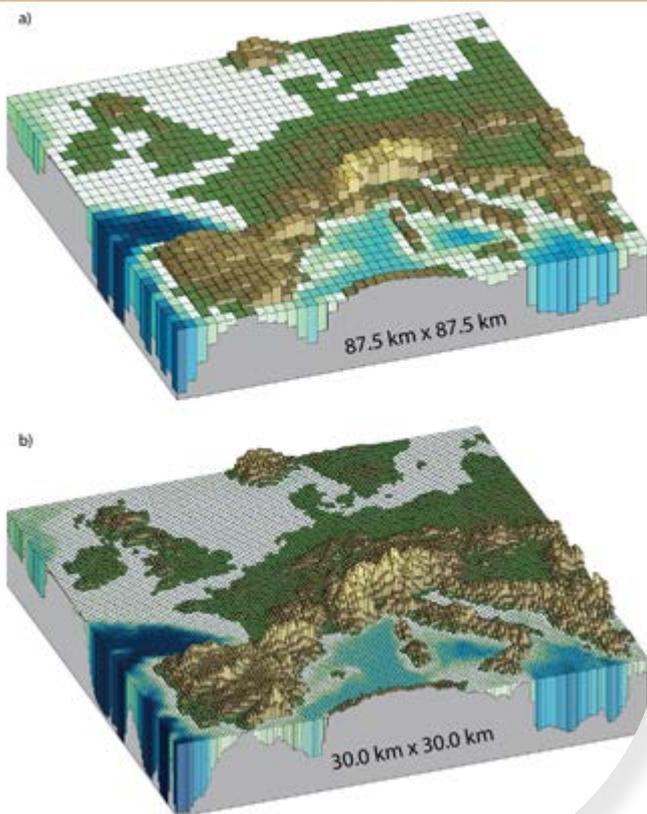
Otra alternativa para mejorar la resolución espacial de los modelos climáticos consiste en utilizar rejillas no uniformes sino con una mayor resolución espacial en la zona de interés (véase Figura 3.19). También se denominan rejillas estiradas (*stretched*, en inglés). Su uso no es muy frecuente por los problemas asociados a las parametrizaciones de los procesos físicos no resueltos explícitamente cuya formulación depende críticamente de la resolución espacial. También presentan problemas para su utilización fuera de la zona con mayor densidad de puntos de rejilla.

La regionalización estadística se basa en el uso de las relaciones empíricas entre predictandos (normalmente observaciones locales de una variable objetivo, tal como la precipitación) y un conjunto de predictores adecuados (normalmente variables a gran escala que determinan el estado sinóptico de la atmósfera, tales como la altura geopotencial o la velocidad del viento) que proceden de rejillas a baja resolución de modelos climáticos o reanálisis globales. En el enfoque denominado Perfect Prog (del inglés, Perfect Prognosis), estas relaciones se obtienen entre predictores que se suponen perfectos (normalmente un reanálisis) y un predictando que es una serie observacional. Posteriormente las relaciones obtenidas se aplican a las simulaciones de GCM con el fin de trasladar sus simulaciones de poca resolución a la escala local requerida por las aplicaciones de impacto al cambio climático. En el esquema de la figura 3.20 se muestra la función empírica,  $F$ , que relaciona puntos de rejilla a baja resolución (predictores) con datos en observatorios de variables climáticas (predictandos).

Las técnicas de regionalización dinámica más habituales, que se basan en el uso de modelos regionales de clima, tienen la importante ventaja de proporcionar variables que son físicamente consistentes entre sí ya que los modelos regionales —al igual que los globales— se basan en principios

Figura 3.18.

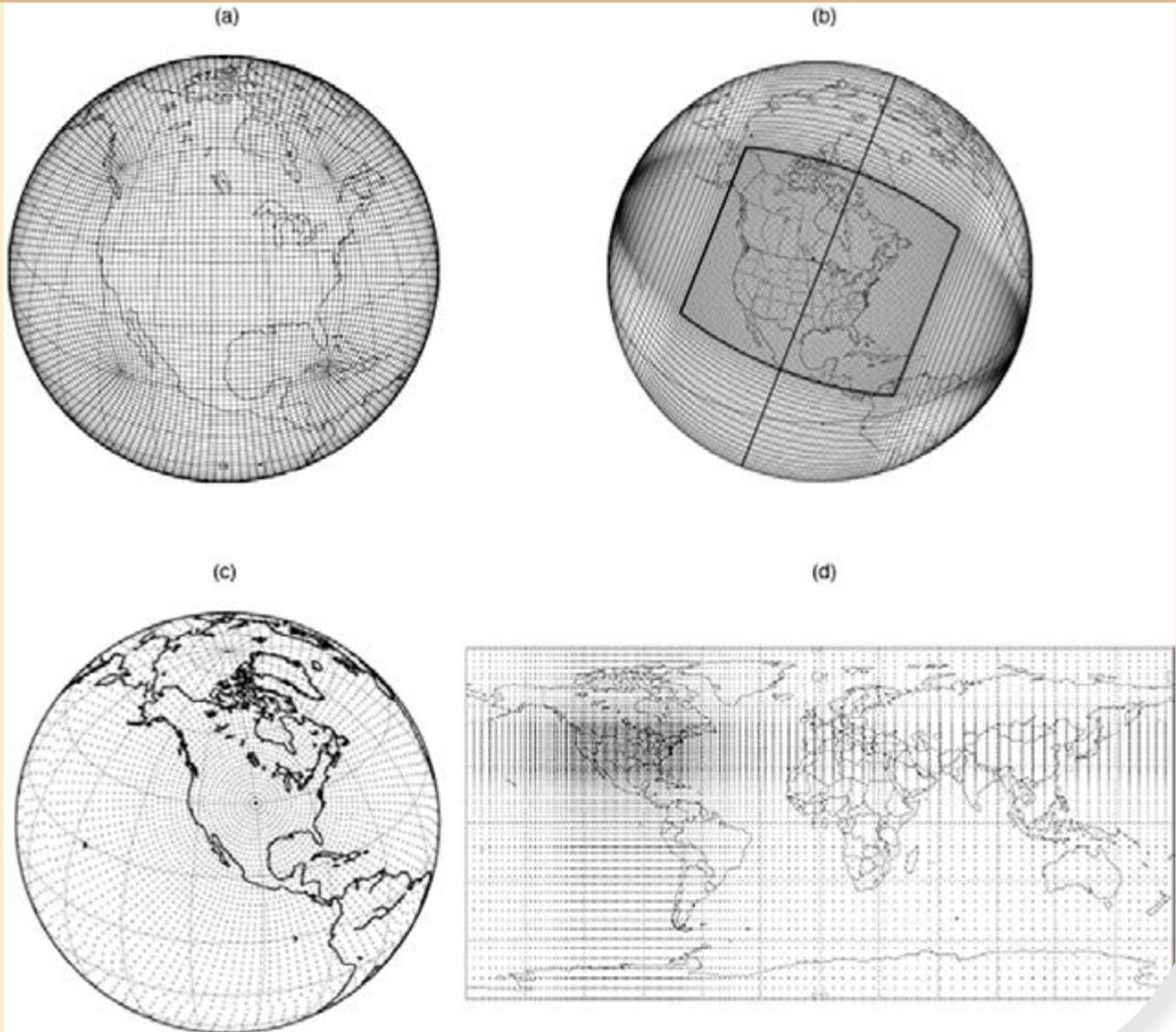
**Ejemplo de resoluciones horizontales en modelos utilizados en el informe AR5 IPCC ilustrando la topografía de Europa: (a) 87.5 × 87.5 km; (b) 30.0 × 30.0 km**



**Fuente:** Cubasch *et al.* 2013

Figura 3.19.

**Rejillas no uniformes utilizadas por diferentes modelos globales**



**Fuente:** Rabinovitz *et al.* 2006

físicos (p. ej., las leyes de la termodinámica y la mecánica de fluidos) que se espera que se mantengan bajo el cambio climático. Poseen también la clara desventaja de necesitar un gran volumen de cálculo lo que limita las resoluciones de las simulaciones a 5-20 km. La Figura 3.21 muestra un esquema de un modelo regional con mayor resolución espacial anidado en un modelo global con menor resolución espacial.

La Figura 3.22 muestra un esquema de las dos principales categorías de técnicas de regionalización (dinámica y estadística) utilizadas actualmen-

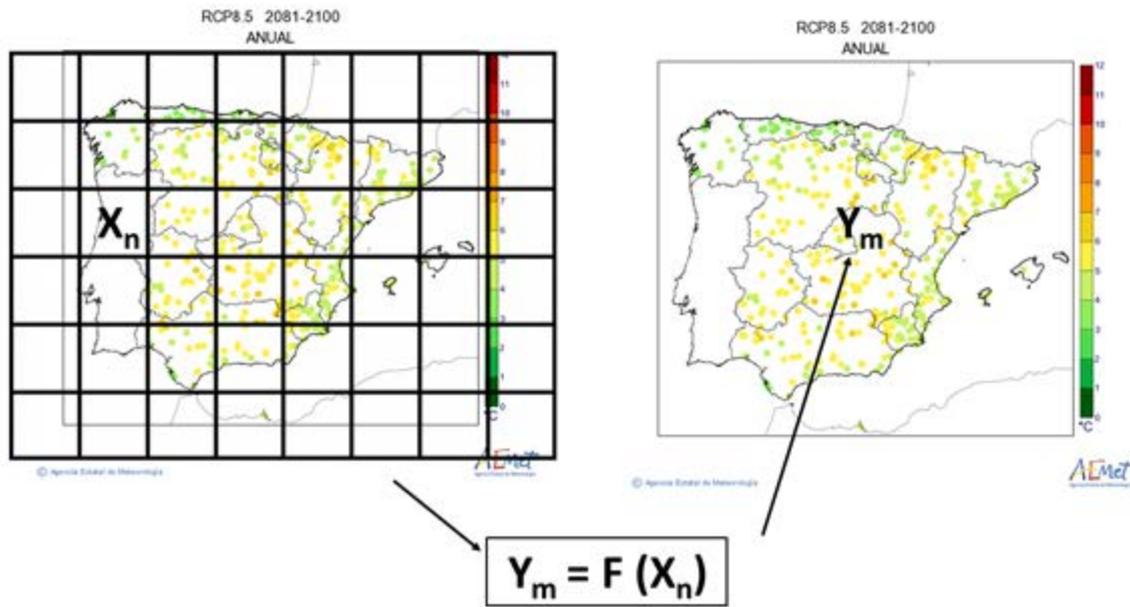
te para descender a escala regional y/o local las simulaciones de los modelos globales.

**3.5.1. Métodos de regionalización dinámicos**

Un modelo climático regional (RCM por sus siglas en inglés) es un modelo numérico de predicción del clima anidado y forzado por condiciones laterales y oceánicas especificadas a partir de un modelo climático global (GCM) o un reanálisis que simula los procesos atmosféricos y de la superficie te-

Figura 3.20.

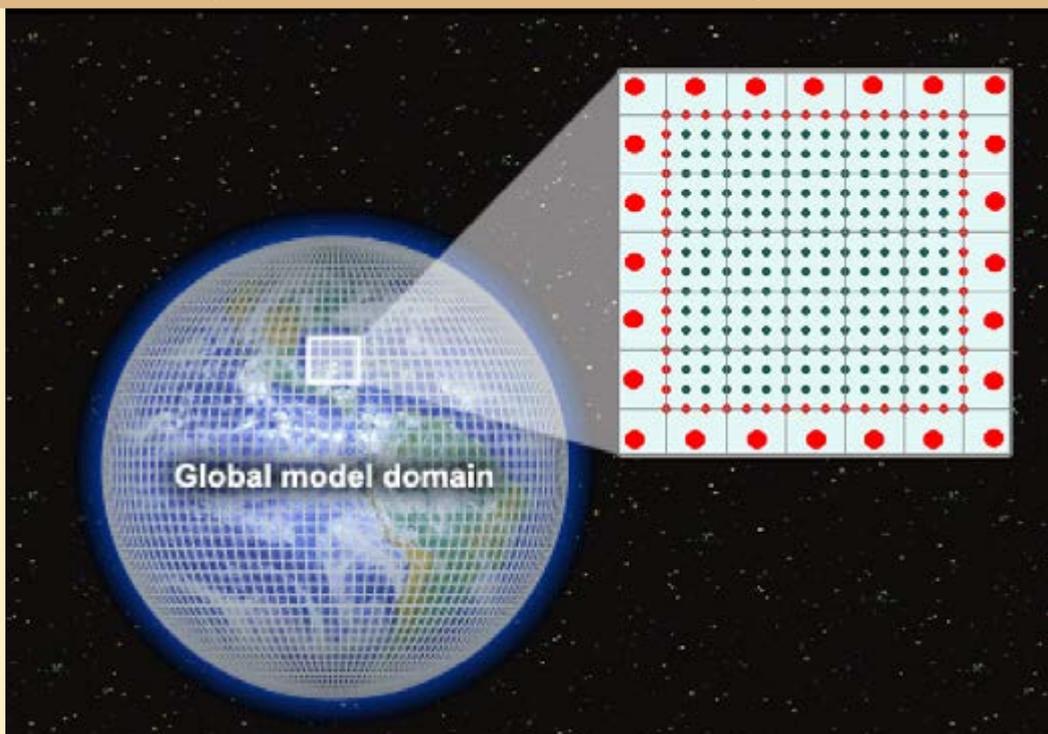
Esquema de las técnicas estadísticas de regionalización que utilizan relaciones entre predictores (normalmente puntos de rejilla procedentes de reanálisis y modelos globales) y predictandos (normalmente variables climáticas [p.ej., temperatura, precipitación] en puntos de observación)



Fuente: elaboración propia

Figura 3.21.

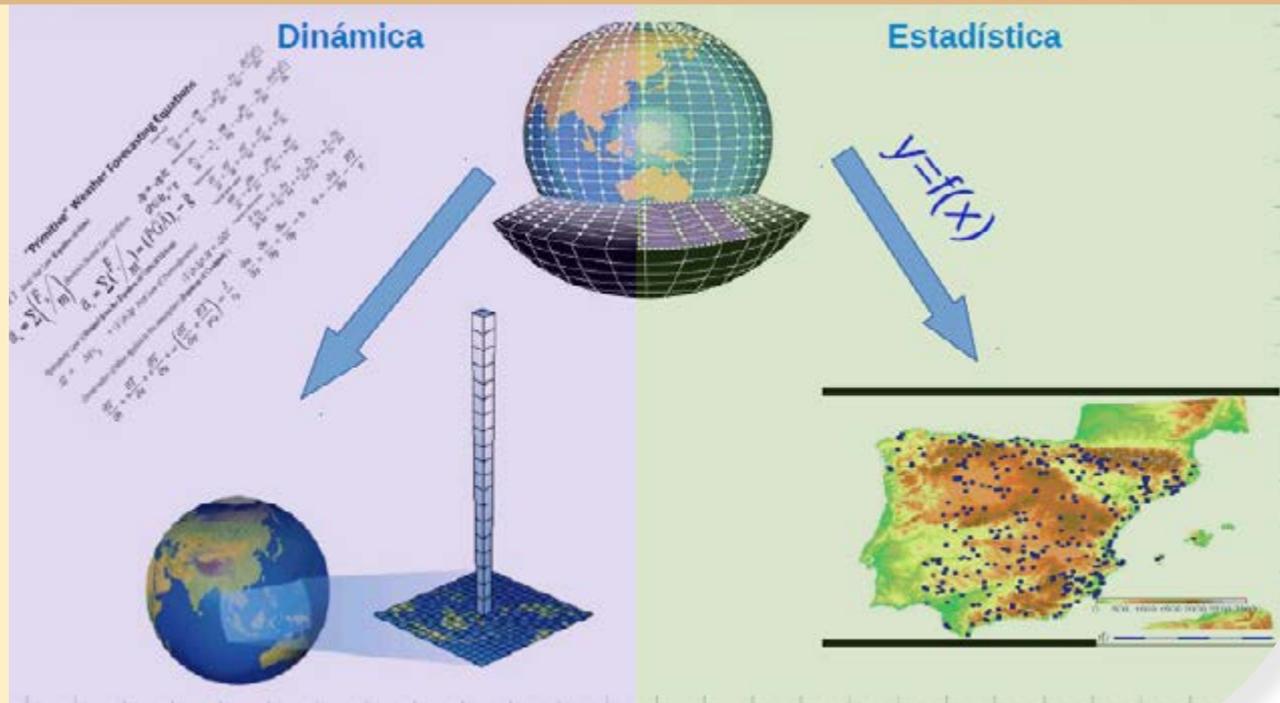
Esquema de modelo regional de clima anidado en un modelo global



Fuente: elaboración propia

Figura 3.22.

**Técnicas de regionalización dinámica y estadística utilizadas para regionalizar las simulaciones de los modelos globales**



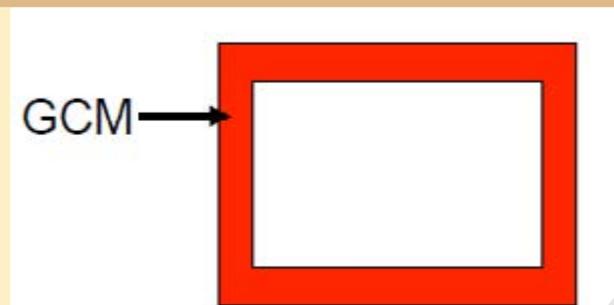
**Fuente:** elaboración propia

resolución con mayor resolución que el modelo global (o reanálisis) en el que se anida. Además, un RCM incluye una resolución mejorada de datos topográficos, contrastes tierra-mar, características de la

superficie y otros componentes del sistema Tierra. Dado que los RCM solo cubren un dominio limitado, los valores en sus límites deben especificarse explícitamente (condiciones de contorno) mediante simulaciones procedentes de un GCM o un reanálisis de menor resolución (Figura 3.23).

Figura 3.23.

**Esquema de las condiciones de contorno procedentes de un GCM que se especifican en una banda alrededor del dominio del RCM y que se emplean para forzar las simulaciones en el interior del dominio**

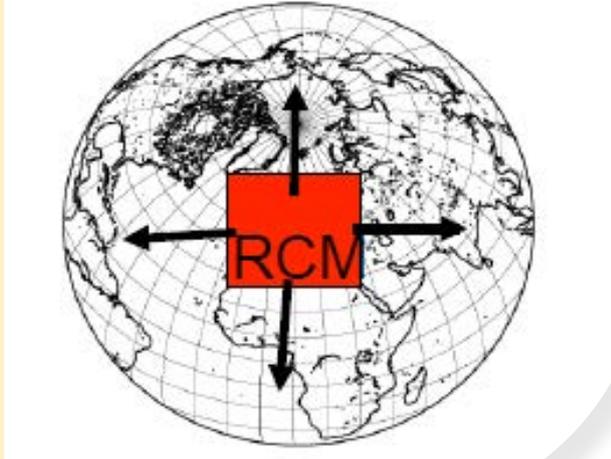


**Fuente:** elaboración propia

En el anterior anidamiento, también llamado unidireccional, se ejecuta en primer lugar la simulación del dominio externo para proporcionar las condiciones de contorno del modelo regional. Existe también la posibilidad de tener un anidamiento bidireccional en el que ambos dominios se ejecutan al mismo tiempo e interactúan por completo. Aunque en teoría un anidamiento bidireccional funcionaría mejor porque permite que las características de menor escala realimenten las características de mayor escala e influyan en el modelo externo, su uso está poco extendido por las complicaciones prácticas en su implementación (véase Figura 3.24).

Figura 3.24.

**Esquema de un anidamiento bidireccional en bidireccional en el que ambos dominios se ejecutan al mismo tiempo e interactúan por completo**



**Fuente:** elaboración propia

Para evitar inconsistencias entre el modelo climático regional y el global a veces se utiliza la técnica de *nudging*. Esta técnica originariamente desarrollada para asimilación de datos se utiliza cada vez más en modelización climática regional para evitar este problema de inconsistencias (Storch *et al.* 2000; Miguez-Macho *et al.* 2004). Esencialmente consiste en añadir en las ecuaciones del modelo regional términos adicionales que fuerzan la convergencia de su solución con la de las variables del modelo global. Frecuentemente se suele hacer el *nudging* en modo espectral para conseguir la convergencia de las escalas grandes (Figura 3.25).

### 3.5.2. Ventajas e inconvenientes de los modelos climáticos regionales frente a los globales

Las diferencias entre las simulaciones RCM y GCM no siempre son muy obvias para magnitudes promediadas en el tiempo para las escalas más grandes o sobre regiones relativamente homogéneas.

Las ventajas de los RCM frente a los GCM son en términos generales:

- Las simulaciones proporcionadas por los RCM al tener mayor resolución sobre la zona de interés poseen mayores detalles espaciales y temporales que los GCM. De hecho, la mayor contribución de los RCM aparece principalmente en la simulación de fenómenos y extremos influenciados por la topografía y de una escala espacial o temporal relativamente pequeña.
- En particular, la regionalización con RCM proporciona mejores patrones de precipitación. En los pocos casos en que los RCM se han acoplado de forma interactiva a modelos globales (es decir, acoplamiento “bidireccional”), los efectos de las pequeñas escalas mejoradas se propagan a escalas mayores y se ha descubierto que esto mejora la simulación de fenómenos a mayor escala.
- La regionalización con RCM mejora la simulación de detalles climáticos espaciales por un mejor forzamiento superficial en regiones con topografía muy variable (p. ej., orografía, lí-

Figura 3.25.

**Esquema de las ecuaciones del modelo regional con los términos adicionales de *nudging***

$$\frac{DT}{dt} = \text{dinamica} + \text{fisica} + \frac{T - T_{GCM}}{\tau} + \frac{T_{GE} - T_{GE - GCM}}{\tau_G}$$

Nudging lateral en todas las escalas y en la zona de relajación

Nudging espectral dentro del dominio y solo para grandes escalas (GE)

**Fuente:** elaboración propia

neas costeras) y para fenómenos y extremos de mesoscala.

- Los RCM se benefician, además, de los desarrollos y validaciones de los modelos de área limitada (LAM, del inglés Limited Area Model) que se utilizan operativamente en la predicción numérica del tiempo. Los RCM típicamente utilizan parametrizaciones físicas más sofisticadas para la capa límite atmosférica y nubes y similares para la radiación y los procesos de superficie.

Los principales inconvenientes de los RCM frente a los GCM son:

- El deficiente tratamiento de las condiciones de contorno laterales habitualmente basado en la relajación de los valores interiores a los valores exteriores proporcionados por el GCM en una banda estrecha de puntos de rejilla puede dar lugar a discontinuidades en las variables sobre todo en las zonas de flujo saliente.
- En general y salvo excepciones los RCM sólo poseen un módulo atmosférico aunque cada vez más empiezan a desarrollarse RCM que incluyen otros módulos (p. ej., océano) consistentemente con los GCM.
- En general y por cuestiones eminentemente prácticas de suministro de condiciones de contorno, no se hacen simulaciones con retroalimentación a los GCM.
- En general, no utilizan parametrizaciones escalables debido a su todavía escasa disponibilidad.

### 3.5.3. Métodos de regionalización estadísticos

El método de regionalización estadístico (también denominado empírico) es un proceso que consta básicamente de dos pasos: (i) entrenamiento o desarrollo de relaciones estadísticas entre las variables climáticas locales (p. ej., el aire de la superficie, temperatura y precipitación) —denominadas predictandos— y variables atmosféricas de gran escala (p. ej., geopotencial o viento

en 500 hPa) denominadas predictores; y (ii) la aplicación de tales relaciones a la salida de proyecciones realizadas con modelos globales del clima para simular las características climáticas locales. La calidad de la regionalización estadística es directamente dependiente de la calidad y longitud de las series observacionales utilizadas y/o de las relaciones entre predictor/predictando derivadas para el periodo observacional. La Figura 3.26 muestra los dos pasos mencionados para el método de regionalización basado en regresión lineal.

Las diferencias entre los distintos métodos estadísticos vienen determinadas por:

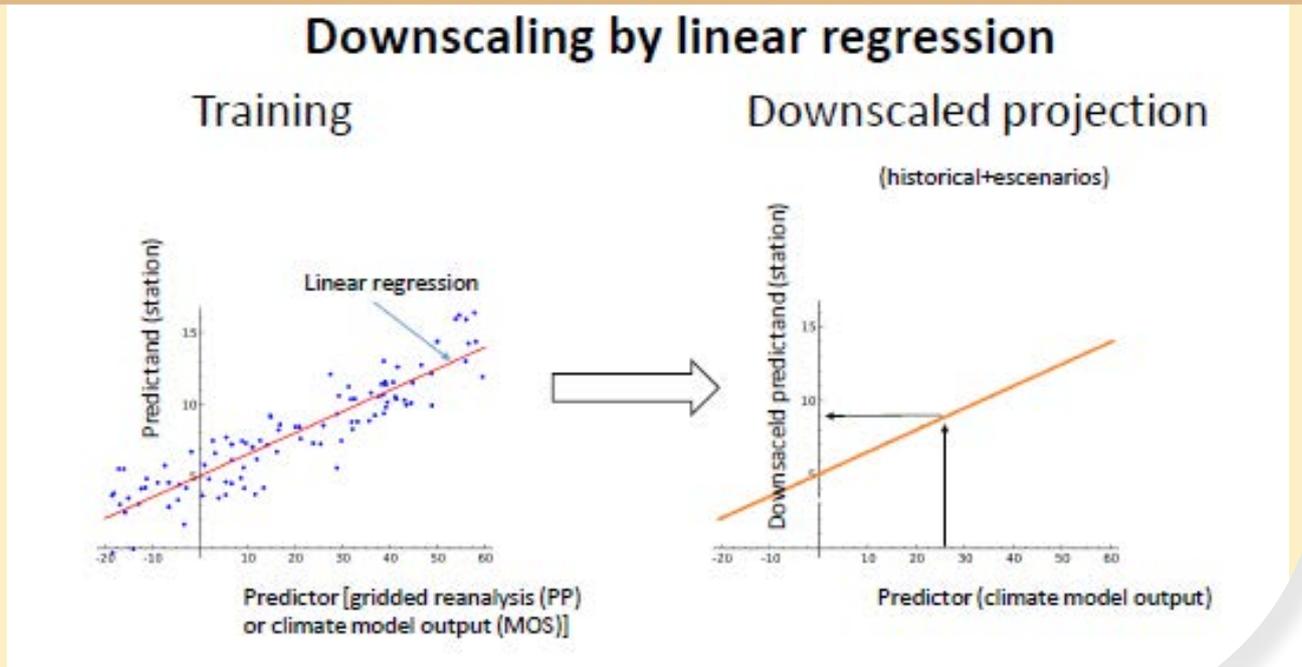
- Conjunto de predictores seleccionados.
- Algoritmo que relaciona los predictores con predictandos.
- La fase de entrenamiento que determina la relación entre predictores y predictandos.

Los predictores tienen un papel crucial en la regionalización estadística y para su selección hay que tener en cuenta los siguientes criterios:

- Los predictores tienen que tener un alto poder predictivo, es decir, los predictores y predictandos deben estar fuertemente correlacionados. De hecho, muchos algoritmos automáticos se basan en este criterio para hacer una selección inicial de los predictores.
- Los predictores deben de capturar el efecto del cambio climático. En la medida en la que queremos regionalizar proyecciones de modelos globales que simulan la evolución del clima, debemos seleccionar predictores que simulen razonablemente bien dicha evolución.
- Los predictores tienen que estar razonablemente bien reproducidos por los modelos climáticos. Los modelos climáticos reproducen razonablemente bien los patrones a gran escala atmosféricos y oceánicos. En consecuencia, debemos seleccionar predictores que describan bien estos patrones y evitar los predictores que muestren gran disparidad con la observación y entre los diferentes modelos.

Figura 3.26.

**Método de regionalización estadístico basado en regresión lineal que consta de dos pasos: (i) entrenamiento y (ii) aplicación de la relación obtenida (línea roja) a la salida de proyecciones realizadas con modelos globales del clima para simular las características climáticas locales**



**Fuente:** elaboración propia

- Los predictores deben tener un vínculo físico con los predictandos. Por ejemplo, sabemos que la precipitación tiene lugar preferentemente en condiciones de advección de vorticalidad y de inestabilidad atmosférica. Entonces, será más adecuado seleccionar como predictores variables derivadas que describan estas condiciones y el consiguiente vínculo con la precipitación.
- La relación entre los predictores y el predictando debe ser estacionaria. Esta condición normalmente se da por supuesta cuando se aplica en condiciones futuras fuera del rango del periodo observacional que se ha utilizado para establecer las relaciones entre predictores y predictandos.
- Un método tipo PP se calibra con predictandos y predictores observados (frecuentemente basados en reanálisis). Para generar proyecciones futuras regionalizadas, el método se aplica luego a las proyecciones de los predictores simuladas por un modelo climático. Los modelos típicos se basan en la regresión (incluido el análisis de correlación canónica y la regresión no lineal como las redes neuronales artificiales), análogos y tipos de clima.
- Un método tipo MOS se calibra con predictandos observados y predictores simulados con un modelo climático. Este enfoque ajusta intrínsecamente los sesgos del modelo. Si bien la sincronía temporal entre predictores y predictandos en PP (porque se observan ambos) permite construir modelos de regresión con una amplia gama de variables predictoras diferentes, en un método tipo MOS el modelo climático no está en sincronía con las observaciones. En un contexto de cambio climático, MOS se restringe típicamente a la corrección de sesgo de la

variable predictora simulada. Las implementaciones más utilizadas son simples correcciones aditivas y de escalado o variantes de mapeo cuantílico más flexible.

- Además, existen los generadores de tiempo (WG, del inglés Weather Generators) que en general son modelos estocásticos que modelan explícitamente al menos los aspectos marginales y temporales de una variable meteorológica, a menudo incluso las relaciones entre un conjunto de variables y a veces también la dependencia espacial.

En la acción COST VALUE se compararon unos 50 métodos de regionalización estadísticos utilizando 86 observatorios (menos de 5% de datos ausentes) en Europa en el periodo 1979-2008. Aparte de la validación general, se evaluaron también aspectos de variabilidad temporal y espacial y evaluación basada en procesos (véanse referencias en la web de la acción COST-VALUE: <http://www.value-cost.eu/>).

### 3.5.4. Ventajas e inconvenientes de los métodos de regionalización dinámicos frente a los estadísticos

Las principales ventajas de los métodos dinámicos son:

- Proporcionan una imagen físicamente consistente de las diferentes variables que están relacionadas y evolucionan según las leyes físicas en las que se basan los modelos regionales.
- Al tener mayor resolución que los GCM puede reducir algunos sesgos, p. ej., los sesgos asociados a una insuficiente resolución como es el caso de las precipitaciones asociadas a la orografía.

Los principales inconvenientes de los métodos dinámicos son:

- Los modelos regionales del clima precisan de grandes recursos computacionales comparables a los requeridos por lo GCM, ya que frecuentemente el relativamente pequeño dominio de los RCM se compensa con la mayor resolución espacial y pasos de tiempo más cortos.

mente el relativamente pequeño dominio de los RCM se compensa con la mayor resolución espacial y pasos de tiempo más cortos.

- En general, se han generado *ensembles* con relativamente pocos miembros para analizar las incertidumbres asociadas a la regionalización dinámica.
- Además los RCM están afectados por sesgos provenientes de los GCM.

Las principales ventajas de los métodos estadísticos son:

- Proporciona valores puntuales al aplicarse sobre puntos observacionales por lo que en principio debería tener un mejor tratamiento de los extremos ya que no incluyen el promedio areal sobre el cuadrado de rejilla para ciertas variables, como es el caso de la precipitación proporcionada por los modelos.
- En general, son computacionalmente más eficientes, si bien algunos métodos estadísticos que hacen uso de algoritmos no lineales pueden también requerir grandes recursos computacionales.
- Puede aplicarse tanto a las salidas de los GCM como de los RCM.

Los principales inconvenientes de los métodos estadísticos son:

- Las relaciones entre predictores y predictandos se calculan en un periodo observacional y se suponen invariables (estacionarias) cuando se aplican en otro periodo (normalmente futuro).
- Son necesarias largas series de datos fiables. Esto implica series largas, con un reducido número de lagunas y con gran calidad. Por ejemplo, deberían pasar tests de homogeneidad que garantizaran el origen puramente climatológico de los cambios observados.
- Las relaciones entre predictores y predictandos, que normalmente se establecen utilizando observaciones para los predictandos y reanálisis para los predictores, están afectados por posibles sesgos cuando las relaciones se aplican sobre predictores provenientes de GCM.

Las anteriores ventajas e inconvenientes de los métodos de regionalización dinámicos y estadísticos aparecen resumidos en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2.

**Resumen de ventajas y desventajas de los dos métodos de regionalización**

<b>Métodos estadísticos</b>		<b>Métodos dinámicos</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Proporciona valores puntuales	Relaciones se suponen estacionarias	Consistencia entre variables	Grandes recursos computacionales
Computacionalmente más eficientes	Necesarias series largas series de datos fiables	Pueden reducir algunos sesgos de los GCM	<i>Ensembles</i> con pocos miembros
Aplicable tanto a GCM como a RCM	Posibles sesgos con predictores de GCM		Afectados por sesgos heredados de los GCM



© Shutterstock

Un visor permite el archivo y fácil visualización de la información disponible de proyecciones regionalizadas de cambio climático sobre una región de interés



## 4. Herramientas de visualización de proyecciones regionalizadas de cambio climático

### 4.1. Visualización y archivo de datos de proyecciones

La comunidad de impactos y adaptación al cambio climático, para estimar las consecuencias del mismo en los distintos sectores sensibles a las condiciones climáticas, precisa poder acceder de una forma amigable y sencilla a proyecciones de cambio climático con una resolución adaptada a las distintas necesidades de los usuarios. Para ello, como se ha visto más arriba, se utilizan técnicas de reducción de escala o regionalización.

Un visor, como el descrito en Capítulo 4.2, permite el archivo y fácil visualización de la información disponible de proyecciones regionalizadas de cambio climático sobre una región de interés. El visor permite organizar el archivo y distribución de proyecciones mediante un repositorio centralizado con funcionalidades de visualización de información integrada en forma de mapas y gráficos y de descarga filtrada de datos numéricos que faciliten su utilización por los distintos sectores sensibles al clima. Idealmente, un visor incluye todos los datos de proyecciones regionalizadas de cambio climático disponibles sobre la región de interés, de forma que se puedan estimar las distintas fuentes de incertidumbre —escenarios de emisión, modelos globales de clima, técnicas de regionalización— que afectan a las proyecciones. En definitiva, un visor deberá estar orientado a facilitar a los usuarios la consulta y descarga de datos de proyecciones regionalizadas de cambio climático.

El visor de **Escenarios de Cambio Climático para Centroamérica** está inspirado en el visor de escenarios AdapteCCa desarrollado con fines similares para España (<http://escenarios.adaptecca.es>) (Gutiérrez Llorente *et al.* 2017). El visor de escenarios AdapteCCa es una iniciativa de la Oficina Española de Cambio Climático (OECC), la Fundación Biodiversidad y Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET), que cuenta también con la colaboración del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de España. El visor ha sido financiado inicialmente por el proyecto LIFE SHARA (Awareness and Governance of Adaptation to Climate, <http://lifeshara.com>) (2016–2021):

- El visor permite interactuar con la climatología de las variables originales (y de distintos índices climáticos definidos a partir de ellas) para un período histórico de referencia que caracteriza el clima actual, así como para tres períodos futuros y para dos escenarios futuros de emisión (RCP4.5 y RCP8.5).
- El visor permite analizar anual o estacionalmente la información, considerando todo el año, o una estación del año en particular (p. ej., verano).
- La información climática espacial se proporciona en forma de mapas, representativos del promedio de los 30 años correspondientes, en forma de rejilla regular (11 km) o de valores puntuales según el tipo de datos que se elijan. Sin embargo, también se puede analizar el carácter temporal de la información (series temporales de valores anuales/estacionales)

agregada para una región geográfica concreta; ya que el visor ofrece distintas opciones de selección políticas (p. ej. provincias o comunidades), y físicas (p. ej., cuencas hidrográficas, o zonas LIC).

- El visor también permite descargar los datos diarios correspondientes a un punto de rejilla o una estación individual (o agregados en una región geográfica) en un formato de fácil lectura, facilitando su acceso y su uso.
- En su versión actual, el visor AdapteCCa no permite descargar la información diaria para un conjunto de puntos de rejilla o estaciones en una región particular, ya que el volumen de información involucrada podría ser demasiado elevado para una descarga *online*. Actualmente, la única opción es descargar la información punto a punto, lo cual sólo es adecuado para estudios locales.

El visor AdapteCCa está integrado dentro de Plataforma de Intercambio y Consulta de Información sobre Adaptación al Cambio Climático en España (AdapteCCa, <http://www.adaptecca.es>), que fue creada en 2013 a partir de una iniciativa conjunta de la OECC, la Fundación Biodiversidad y las unidades responsables en materia de adaptación al cambio climático de las comunidades autónomas. La Plataforma AdapteCCa surge como respuesta ante la necesidad de generar un espacio común de información y de intercambio de conocimiento y experiencias en materia de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el ámbito territorial de España. AdapteCCa se diseñó buscando la máxima sinergia con la plataforma europea de adaptación Climate-ADAPT (<https://climate-adapt.eea.europa.eu/>), lanzada en 2012 por la Comisión Europea y la Agencia Europea de Medio Ambiente. En la actualidad, AdapteCCa es un espacio para la gestión del conocimiento consolidado que, sin embargo, se encuentra en plena evolución. En el marco del proyecto europeo LIFE SHARA se implementan de forma continua mejoras de diseño y estructura, ampliación de contenidos (p. ej., con la incorporación de un módulo de casos prácticos o un banco de imágenes), ampliación de las funcionalidades existentes (p. ej., con

la mejora del buscador documental) o la creación de otras nuevas (módulos para la creación de grupos de trabajo o para la celebración de *webinars*). La plataforma AdapteCCa puede servir de ejemplo para plataformas similares de información y de intercambio de conocimiento y experiencias en materia de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el ámbito territorial de la región centroamericana o, en general, en la región latinoamericana.

Además el visor de escenarios AdapteCCa ha servido también como modelo para el nuevo atlas de proyecciones de cambio climático del Grupo de Trabajo I del Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC. El nuevo atlas permitirá visualizar (cuando se apruebe la contribución del Grupo de Trabajo I al AR6 previsto para agosto de 2021) tanto datos de modelos globales (CMIP6) como de modelos regionales (CORDEX) de las variables temperatura y precipitación e índices derivados de estas. Los datos CORDEX se incorporarán al atlas cuando estén disponibles. Se pueden elegir en el atlas entre las diferentes opciones de estaciones, regiones y escenarios. Los nuevos escenarios de emisión en AR6 se basan en trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP, por sus siglas en inglés) combinadas con trayectorias de concentración representativa (RCP, por sus siglas en inglés). También se puede optar por representar una variable o índice para un alcance temporal o para un nivel de calentamiento global.

#### **4.2. Visor de escenarios de cambio climático EUROCLIMA+ para Centroamérica**

El Visor de Escenarios de Cambio Climático, desarrollado en el marco de la acción “Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para Centroamérica” (véase Capítulo 2) del programa EUROCLIMA+ (<https://centroclima.org/escenarios-cambio-climatico/>) está orientado a facilitar la consulta de proyecciones regionalizadas de cambio climático para Centroamérica, realizadas a partir de las proyecciones globales del Quinto Informe

de Evaluación (AR5) del IPCC. Esta acción integra los resultados del proyecto internacional de regionalización dinámica CORDEX (<https://cordex.org/>) con varios métodos de regionalización estadística desarrollados por AEMET.

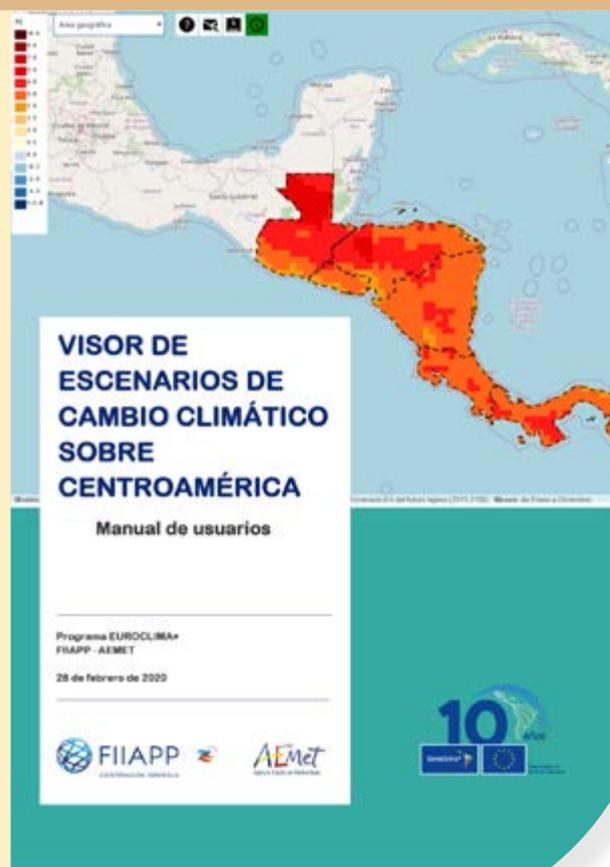
El Visor de Escenarios de Cambio Climático para Centroamérica está concebido como una herramienta de exploración y de descarga filtrada de datos. Los productos que se presentan en el visor (véase el Manual de Usuarios (Figura 4.1) disponible en este enlace: [https://euroclimaplus.org/media/attachments/2021/09/29/manual\\_usuariov3.pdf](https://euroclimaplus.org/media/attachments/2021/09/29/manual_usuariov3.pdf)) proceden de las proyecciones, a escala diaria, de variables obtenidas mediante técnicas de regionalización dinámica (que proporcionan resultados en una rejilla regular de 50 km de resolución) y estadística (que proporcionan resultados en una rejilla regular de hasta 5 km de resolución). Dichas proyecciones contemplan tres escenarios de emisión de uso habitual (RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5) así como un escenario de referencia (Histórico).

Además del desarrollo de la herramienta, en el marco de la acción se ha procedido a crear un grupo de trabajo técnico con participación de representantes de todos los servicios meteorológicos centroamericanos que permita, por un lado, un mantenimiento y mejora continua del visor (p. ej., añadiendo nuevas funcionalidades como indicadores sectoriales adicionales, datos más actualizados, etc.), y por otro una interacción fluida con los usuarios que dé respuesta rápida a sus demandas de información. El grupo de trabajo además será activo en promover un mayor conocimiento y uso del visor a través de la realización de talleres y eventos con potenciales usuarios.

El visor permite realizar consultas sobre 37 variables climáticas e índices derivados, obtenidos con dos técnicas de regionalización estadística y 11 simulaciones con modelos regionales (regionalización dinámica). Para cada uno de los índices, la aplicación muestra un mapa interactivo que permite visualizar el valor promedio del período histórico (1970-2000), así como las climatologías

Figura 4.1.

**Manual de usuarios del visor de escenarios de cambio climático sobre Centroamérica (disponible en este enlace: [https://euroclimaplus.org/media/attachments/2021/09/29/manual\\_usuariov3.pdf](https://euroclimaplus.org/media/attachments/2021/09/29/manual_usuariov3.pdf))**



proyectadas para tres períodos futuros: próximo (2011-2040), medio (2041-2070) y lejano (2071-2100). Además, la aplicación permite generar series temporales regionales (mensuales, anuales o para una estación definida por el usuario) y para un área territorial también escogida por el usuario entre áreas predeterminadas o definida por el mismo con ayuda de polígonos. Estos gráficos se elaboran a partir del promedio espacial de los índices para cada una de las proyecciones disponibles que, en este caso, se consideran equiprobables (y por tanto, definen el rango de resultados posibles según los modelos y la técnica de regionalización utilizados). En el caso de los períodos futuros, es-

tas consultas pueden realizarse, bien sea para el valor real de la variable (por ejemplo, grados centígrados para temperaturas), o para las diferencias/cambios (por ejemplo, calentamiento, también en grados centígrados) con respecto al clima del período histórico.

La aplicación es una herramienta web que se actualizará a medida que se generen nuevos datos e información relativa a proyecciones de cambio climático regionalizadas y a medida que los usuarios orienten la demanda de nuevos productos. En este sentido, la aplicación (Figura 4.2) y el manual de usuario (Anexo) deben contemplarse como una herramienta y un documento que serán sometidos a una periódica mejora y revisión. La Figura 4.3 muestra las proyecciones regionalizadas con métodos estadísticos (análogos y regresión) y dinámicos (CORDEX) disponibles en el visor. Se pueden seleccionar proyecciones individuales o la com-

binación de una familia de proyecciones para un mejor análisis de las incertidumbres procedentes de los modelos globales y de las técnicas de regionalización.

La Figura 4.4 muestra la tabla de variables e indicadores disponibles en el visor agrupados por variables e indicadores relacionados con la temperatura, precipitación, viento y otras variables. Como se observa en la figura se puede seleccionar la opción de valores originales o de cambios respecto a un periodo de referencia. Esta última opción siempre es la más recomendable para eliminar posibles sesgos de los modelos.

Finalmente la Figura 4.5 muestra las opciones de escenarios de emisión (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) y períodos (histórico y escenarios futuros para tres horizontes temporales (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) disponibles en el visor.

Figura 4.2.

**Visor de escenarios de cambio climático para Centroamérica (<https://centroclima.org/escenarios-cambio-climatico/>)**



Figura 4.3.

Tabla de proyecciones regionalizadas con métodos estadísticos (análogos y regresión) y dinámicos (CORDEX) disponibles en el visor de escenarios de cambio climático para Centroamérica



Figura 4.4.

Tabla de variables e indicadores disponibles en el visor de escenarios de cambio climático para Centroamérica

### Escenarios Cambio Climático

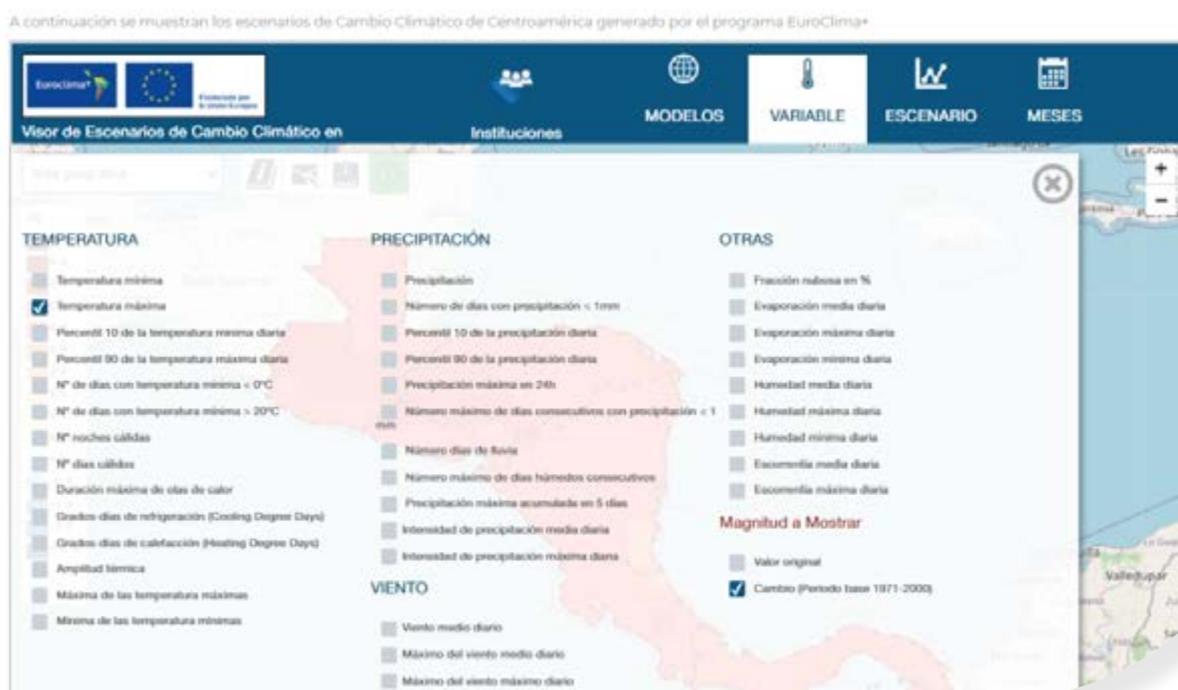
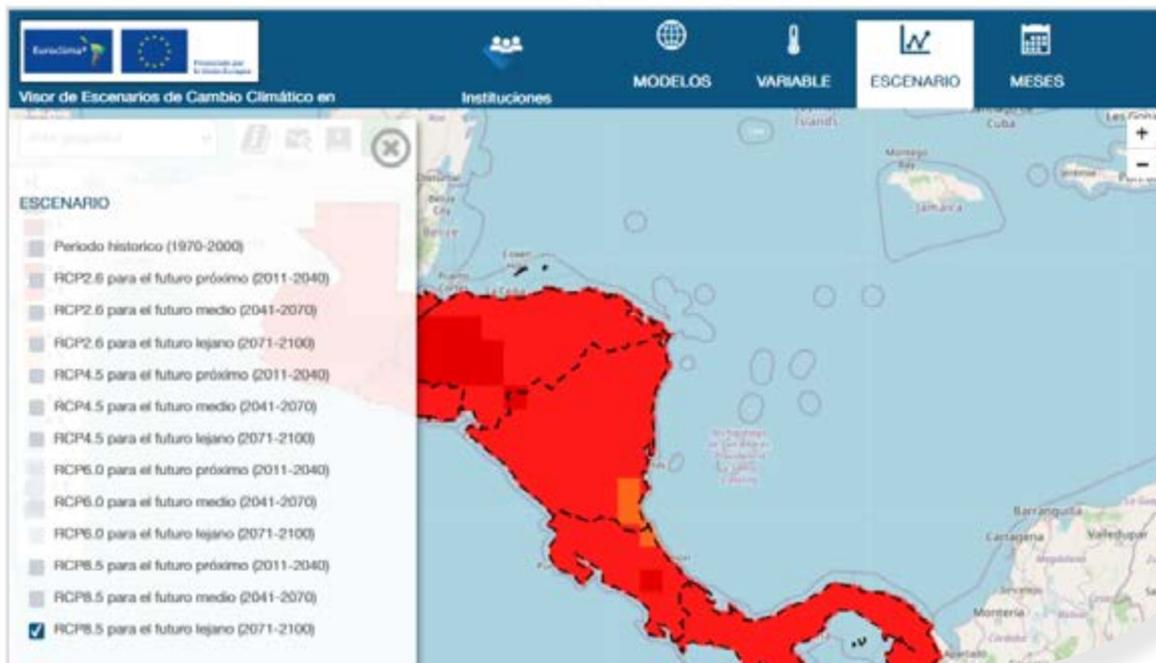


Figura 4.5.

**Tabla de escenarios de emisión y períodos histórico y de escenarios disponibles en el visor de escenarios de cambio climático para Centroamérica**

### Escenarios Cambio Climático

A continuación se muestran los escenarios de Cambio Climático de Centroamérica generado por el programa EuroClima+



### 4.3. Papel de los usuarios en el diseño del visor de proyecciones de cambio climático

Dentro de las actividades previstas en la acción de generación de escenarios regionalizados para Centroamérica en el marco del programa EUROCLIMA+, tuvo inicialmente lugar la realización de una serie de talleres nacionales con usuarios de sectores prioritarios para la adaptación al cambio climático en cada uno de los países con objeto de presentar la acción y recabar sus opiniones y necesidades. En estos talleres nacionales se contó con representantes de diferentes instituciones que eran susceptibles de utilizar los escenarios regionalizados generados como parte de la acción. Se procuró tener un equilibrio entre el número de asistentes y sectores representados y la capacidad de discutir dentro de un tiempo razonable, al estar restringidos los talleres a una jornada.

Todos los talleres tuvieron el mismo formato. Se comenzaba con una presentación de los objetivos de la acción (véase Capítulo 2) consistentes principalmente en: i) talleres de capacitación; ii) generación de escenarios regionalizados para la región; iii) creación de un visor para explorar y descargar datos de escenarios. A continuación, y tras aclarar algunos conceptos y discutir sobre los diferentes aspectos de la acción, se establecía una discusión en grupos para debatir necesidades de los usuarios y propuestas de posibles características del visor de escenarios a desarrollar por la acción. Se planteaban a los asistentes las siguientes preguntas para su debate: i) nivel de agregación temporal: estación seca/húmeda, trimestres, etc.; ii) áreas predeterminadas dentro de un mismo país con criterios geográficos, climatológicos o políticos; iii) lista inicial de variables e indicadores climáticos para sectores prioritarios; iv) posibles nuevas potencialidades del visor no incluidas en el visor de AdapteCCa que se tomó como modelo inicial. Estos

talleres iniciales permitieron, en primer lugar, dar a conocer la acción de escenarios regionales y visor asociado y, en segundo lugar, recabar información sobre las necesidades de los diferentes sectores que potencialmente podrían incluirse en la versión preliminar del visor. Finalmente, el visor incorporó el máximo de sugerencias posibles teniendo en cuenta las propuestas y necesidades del resto de países de la región y los tiempos de la acción (el visor fue finalizado en diciembre 2019) que imponía limitaciones a la cantidad de potencialidades que se podían incorporar al visor.

Tras la generación del visor se realizó otra ronda de talleres nacionales que tuvieron como principales objetivos: i) presentar los resultados de la acción a los usuarios de escenarios de cambio climático nacionales; ii) familiarizar a los usuarios en el uso del visor; iii) explicar el proceso para incluir aportaciones de los usuarios al visor. En estos talleres nacionales se describieron los principales resultados de la acción incluyendo los escenarios regionalizados calculados y una descripción del visor. En la parte correspondiente a los escenarios calculados, se presentaron los distintos tipos de escenarios,

datos utilizados, peculiaridades de los datos, métodos de regionalización, comparación de las series históricas: datos observacionales/modelados y ejemplos de aplicaciones de los escenarios. En la parte correspondiente a la descripción del visor, se insistía en sus características y funcionalidades (distintas de las de un repositorio), se describía la guía de usuario (véase Anexo), y el proceso para su mejora en una segunda fase de la acción. Además, en estos talleres se incluyó la presentación de un ejemplo de uso de escenarios regionalizados para la gestión integrada de recursos hídricos en España, dado que este sector es considerado prioritario para la región centroamericana.

Como punto de partida para una segunda fase de la acción se propusieron los siguientes puntos: a) selección de sectores relevantes; b) definición de indicadores sectoriales; c) utilización de modelos que traduzcan evolución de variables climáticas (p. ej., precipitación, temperatura) en evolución de variables sectoriales (p. ej., producción agrícola, potencia eólica); d) discusión y diseño del concepto de toda la cadena con la participación de equipos pluridisciplinarios; e) visualización; f) evaluación.

La calidad de los resultados obtenidos a partir del análisis de datos climáticos, dependerá de la observación de una serie de buenas prácticas



## 5. Buenas prácticas en el uso e interpretación de los datos del visor

- **Explorar incertidumbres (multi-escenarios de emisión, multi-modelo, multi-condiciones iniciales, multi-regionalización, etc.)**

Como se ha visto más arriba las proyecciones de cambio climático —y en particular las proyecciones regionalizadas— están afectadas de múltiples incertidumbres que aparecen de forma jerárquica en el proceso de generación de dichas proyecciones, comenzando desde el establecimiento de los escenarios alternativos de posibles evoluciones en las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles, que afectan al forzamiento radiativo, hasta los algoritmos que proyectan las evoluciones a escala regional. Estas incertidumbres se pueden describir en forma jerárquica o de cascada (Mitchell y Hulme 1999), de tal forma que cada paso conducente a la generación de proyecciones regionales hereda todas las incertidumbres de los pasos anteriores. De todas las fuentes de incertidumbre habitualmente se exploran básicamente tres: las asociadas a las emisiones, las asociadas a los modelos globales de circulación general y las asociadas a las técnicas de regionalización. También se suele explorar la incertidumbre asociada a la variabilidad climática mediante simulaciones con diferentes condiciones iniciales. La figura 5.1 ilustra tres niveles de una cascada de incertidumbre debidos a la elección del escenario de emisión (RCP), el modelo global y la reali-

zación de la variabilidad climática.

En consecuencia, cuando se estima la evolución del clima nunca se debe representar una única evolución sino una colección de evoluciones alternativas que permitan visualizar las incertidumbres existentes.

- **Aunque los datos y las simulaciones pueden poseer una resolución diaria, su uso siempre deberá ser climático.**

Por ejemplo, no tiene sentido comparar un año aislado, digamos 2010, con otro año aislado, digamos 2090, sino el promedio climático 2000-2030 con otro promedio climático 2070-2100. Hay que tener siempre presente que nos estamos refiriendo al clima y no al tiempo. Usualmente se proporcionan datos con frecuencia diaria, bien para calcular algunos indicadores de extremos meteorológicos y su posible cambio asociado al cambio en el clima, o bien porque esta resolución es requerida como datos de entrada para diferentes modelos de aplicación. Aunque se disponga de datos diarios (asociados al tiempo) su utilización deberá ser siempre para calcular parámetros asociados al clima. La Figura 5.2 muestra una analogía entre tiempo y clima: la ropa que nos ponemos en un determinado día (tiempo) y el tipo de vestidos que tenemos en nuestro armario (clima).

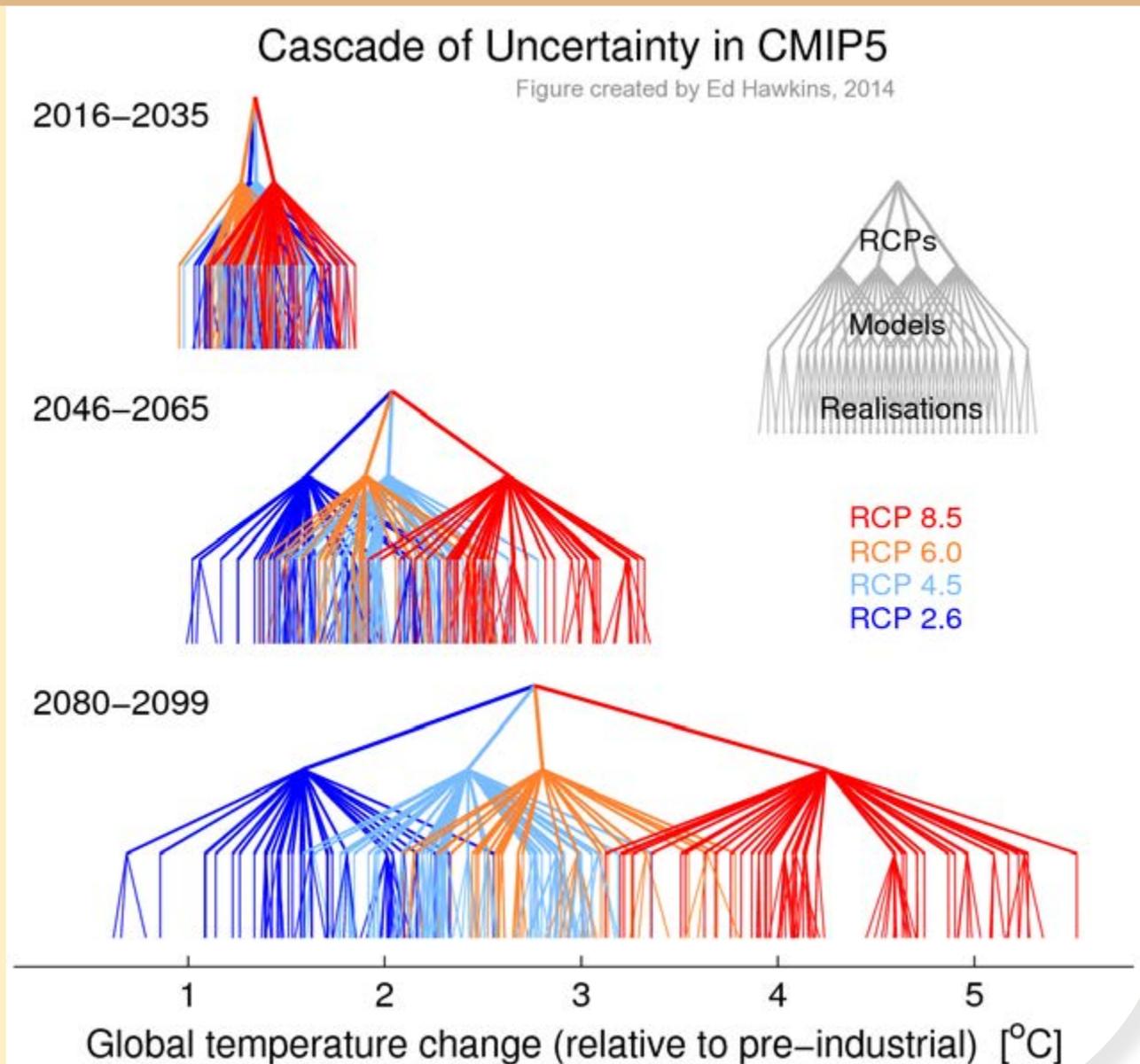
- **Expresar en forma probabilística (pdf, rango, percentiles, etc).**

Como ya se ha explicado, la multiplicidad de realizaciones para estimar la evolución del clima considerando las distintas fuentes de incertidumbre deberá expresarse en forma probabilística, idealmente mediante funciones de densidad de probabilidad (pdf). Otras

formas más simplificadas de expresar la dispersión estadística son también recomendables, p. ej., rango de valores, rango intercuartílico, etc. La figura 5.3 muestra la analogía utilizando un *pinball*. El destino de una bola aislada no da cuenta del comportamiento de la distribución de las probabilidades como sí lo da el número de bolas que cae en cada casilla inferior. El panel de la izquierda de la

Figura 5.1.

**Ilustración de la “cascada de incertidumbre” para la temperatura media global de la superficie con diferentes escenarios de emisión, diferentes modelos y diferentes condiciones iniciales**



**Fuente:** Ed Hawkins, <https://www.climate-lab-book.ac.uk/2014/cascade-of-uncertainty/>

figura nos muestra la distribución de probabilidades del clima de referencia, mientras que el de la derecha nos muestra la distribución en un clima perturbado.

- **Corrección de sesgos de los modelos.**

Aunque los modelos han evolucionado y mejorado mucho desde las primeras generaciones de modelos climáticos, las simulaciones todavía presentan ciertas diferencias con el mundo real. En particular, los modelos cuando se integran en largos periodos de tiempo tienden a su propia climatología que no tiene por qué coincidir con la real. La figura 5.4 muestra un es-

quema del espacio de fases para simulaciones climáticas. Las incertidumbres en las condiciones iniciales en las simulaciones climáticas hacen crecer el abanico de evoluciones posibles hasta rebasar los límites de la climatología real llegando finalmente las simulaciones hasta la propia climatología del modelo. Para paliar este problema se recurre bien a corregir los sesgos de los modelos mediante la comparación con datos reales o bien a eliminar los sesgos expresando la climatología de un periodo futuro respecto a la climatología simulada en un periodo histórico de referencia en la esperanza de que los sesgos en ambos periodos se cancelen.

Figura 5.2.

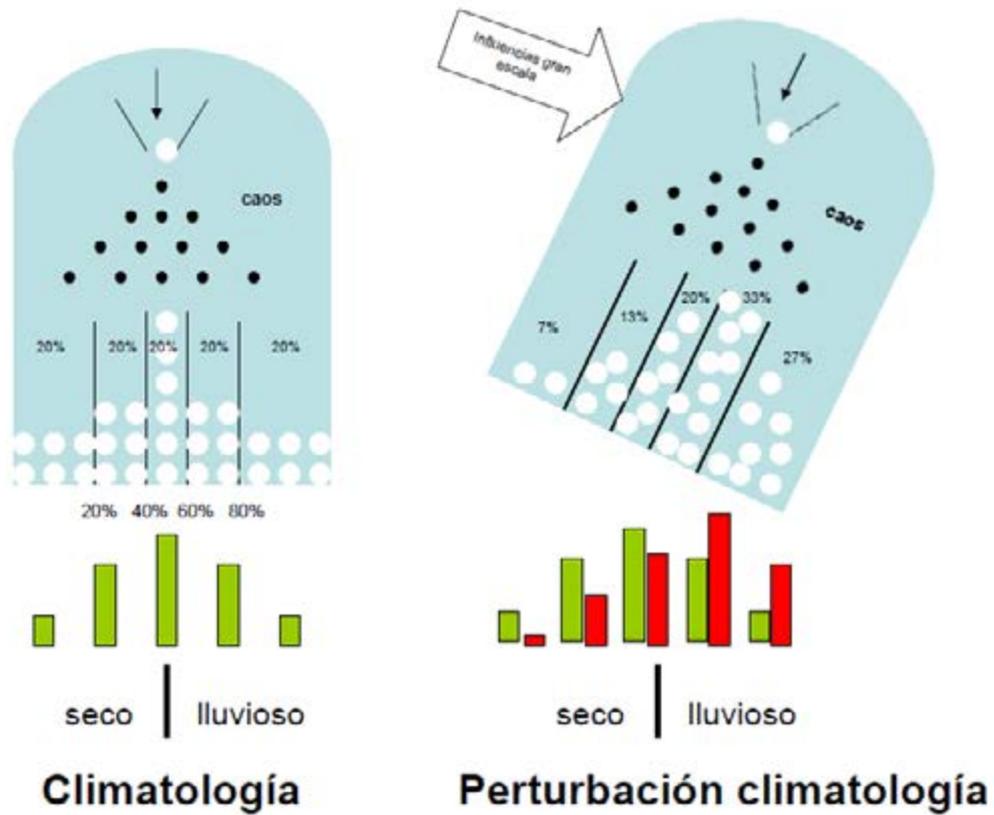
**Analogía entre tiempo y clima: la ropa que nos ponemos en un determinado día (tiempo) y el tipo de vestidos que tenemos en nuestro armario (clima)**



Fuente: [www.ncei.noaa.gov](http://www.ncei.noaa.gov)

Figura 5.3.

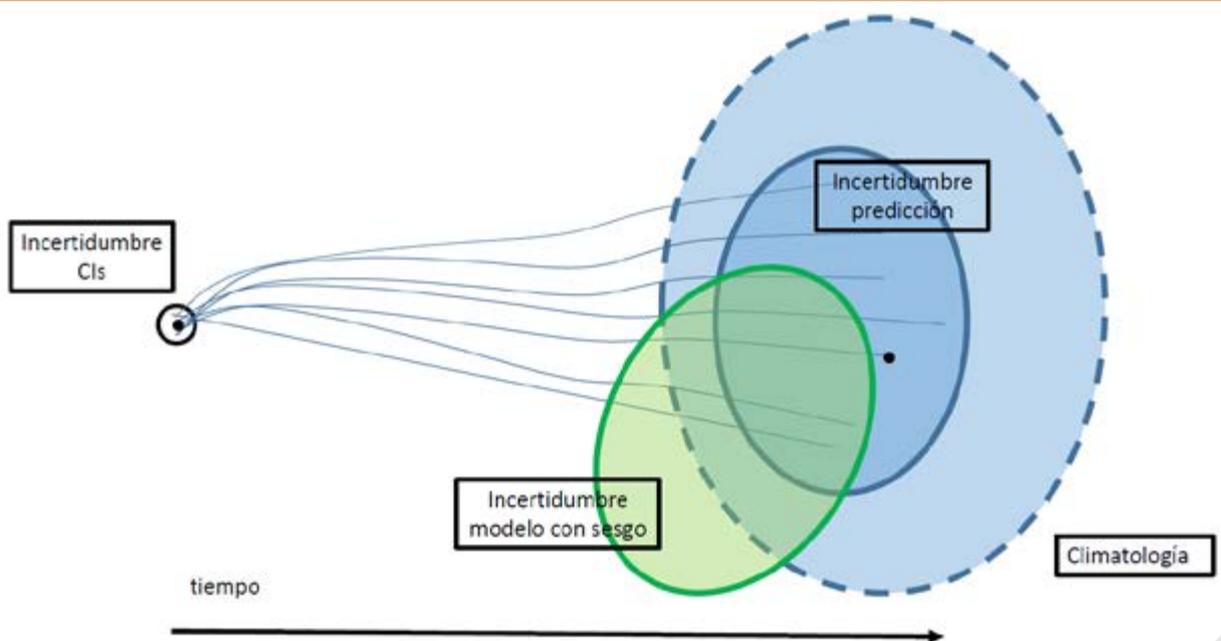
**Pinball como analogía de una distribución de probabilidades de referencia y perturbada**



Fuente: elaboración propia

Figura 5.4.

**Esquema de simulaciones climáticas que muestran el sesgo de los modelos que tienden a su propia climatología y que no tiene por qué coincidir con la real**



Fuente: elaboración propia

La figura 5.5 muestra las correcciones de la pdf para simulaciones en un periodo de referencia histórico y otro futuro. Las correcciones de sesgo se calculan comparando las simulaciones en el periodo histórico con datos reales.

- **Evaluación de modelos globales**

Todos los modelos poseen una serie de capacidades y limitaciones que es necesario conocer y evaluar previamente a su utilización para generar estimaciones de la evolución del clima. El proceso de analizar un modelo y comparar sus simulaciones con las observaciones en un periodo histórico es lo que habitualmente se conoce por evaluación de un modelo. El proceso de evaluación puede realizarse bien cualitativamente, utilizando diagnósticos, o bien cuantitativamente mediante el uso de métricas. Un diagnóstico es una magnitud derivada de la salida de un modelo, a menudo utilizada para comparar con observaciones o con las salidas de otros modelos. Entre los ejemplos de diagnósticos se incluyen los mapas espaciales, las series temporales, las distribuciones de frecuencias, la sensibilidad climática, etc. Una métrica es una medida estadística cuantitativa

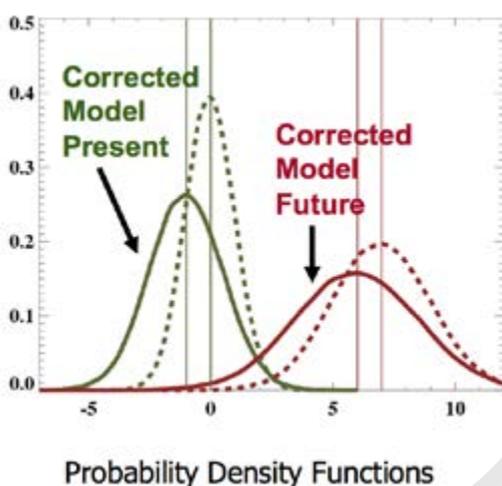
del acuerdo entre una magnitud simulada y la misma magnitud observada que puede utilizarse para evaluar el grado de calidad de los modelos individuales. Una métrica puede estar referida a un proceso específico para cuantificar cómo de bien dicho proceso está representado en un modelo.

Existen diferentes formas de evaluar los modelos, si bien casi todas se pueden agrupar en evaluaciones a nivel de los componentes del modelo y en evaluaciones a nivel de la totalidad del sistema, donde el foco se centra en las salidas del modelo total. La evaluación de un modelo y, por lo tanto, la confianza que depositamos en él, proviene de distintas líneas, siendo la conjunción de todas las líneas o enfoques la que realmente incrementa nuestra confianza en el modelo en cuestión. No es inhabitual que sistemas constituidos por subsistemas de un alto grado de calidad se degraden al acoplarse entre ellos inadecuadamente o con un ajuste (*tuning*) defectuoso o insuficiente. Las evaluaciones de los modelos se realizan en periodos correspondientes bien al clima presente o bien a climas pasados. En general, los diferentes modelos se han utilizado para simular el cambio climático observado durante el siglo XX, si bien los cambios en los forzamientos (p. ej., radiación solar, actividad volcánica, etc.) no se conocen perfectamente en dicho periodo.

Las evaluaciones de los modelos globales del clima se realizan también en diferentes escalas temporales, así permiten conocer las capacidades de los mismos para simular la variabilidad climática a gran escala en rangos temporales que abarcan desde la escala sinóptica hasta la decenal y secular. Es muy importante conocer la capacidad de los modelos climáticos para simular con precisión los modos de variabilidad de baja frecuencia que condicionan fuertemente el clima en muchas regiones. Este es el caso, por ejemplo, de Europa Occidental y de la Península Ibérica en particular, cuyas precipitaciones están correlacionadas con la fase e intensidad del patrón

Figura 5.5.

**Esquema de corrección de pdf de simulaciones en periodo histórico y en periodo futuro**



Fuente: elaboración propia

de la Oscilación del Atlántico Norte (véanse diferentes enfoques de evaluación de modelos globales en Casado Calle *et al.* 2011)

- **Analizar y comparar toda la información contenida en el visor**

Un visor de proyecciones regionalizadas como el que se describe en este estudio temático permite estimar incertidumbres procedentes de distintas fuentes, combinar modelos globales, técnicas de regionalización, etc. El análisis pormenorizado de toda la información disponible y de las coincidencias y diferencias entre

variables, modelos, técnicas de regionalización, etc. permitirá determinar la robustez de las conclusiones para su aplicación posterior en estudios de impactos y adopción de estrategias de adaptación. La guía desarrollada para comparar y analizar los datos de proyecciones climáticas generadas por AEMET para el visor AdapteCCa (Amblar *et al.* 2017) muestra un ejemplo de análisis y comparación de las proyecciones para diferentes variables e indicadores derivados. Un análisis de este tipo permite valorar toda la información y estar en disposición de asesorar a los diferentes usuarios de las proyecciones regionalizadas.



© Shutterstock

La transformación de los datos climáticos en productos que se pueden integrar fácilmente en la toma de decisiones



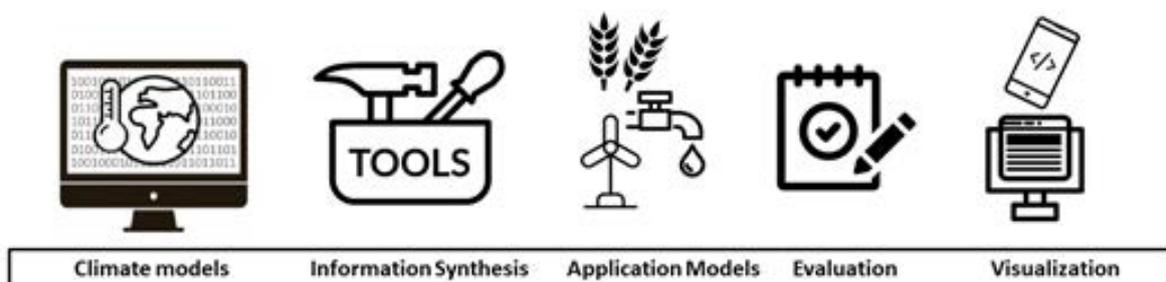
## 6. Servicios climáticos basados en proyecciones regionalizadas de cambio climático

La transformación de los datos climáticos en productos que se pueden integrar fácilmente en la toma de decisiones se puede describir a través de una cadena de desarrollo de servicios climáticos básicos basada en los componentes del Marco Mundial para los Servicios Climáticos (GFCS, de sus siglas en inglés) (Lucio y Grasso, 2016). La mayoría de los servicios climáticos sectoriales basados en proyecciones regionalizadas de cambio climático comparten un conjunto común de pasos que comienzan con los resultados del modelo global de clima y terminan con pronósticos probabilísticos para los indicadores y/o variables definidos por el usuario. El esquema de la Figura 6.1 muestra los pasos principales en un conjunto típico basado en predicciones sectoriales. Los datos de los modelos climáticos globales procedentes de los sucesivos proyectos CMIP (Coupled Model

Intercomparison Project) están disponibles en el portal Earth System Grid Federation COG (<http://esgf-node.llnl.gov/>) y en el repositorio de datos climáticos (CDS por sus siglas en inglés) del Servicio de Cambio Climático de Copernicus (<https://cds.climate.copernicus.eu>) siendo ambos portales la fuente más utilizada de proyecciones de cambio climático. Una vez seleccionados los datos de modelos globales el siguiente paso consiste en la aplicación de un conjunto de herramientas y técnicas para adaptar la información para su uso por parte de los usuarios de la comunidad de impactos. Entre este conjunto de herramientas se suelen incluir, entre otras: la regionalización (para mejorar la resolución del modelo y por lo tanto capacidad de representar pequeñas escalas espaciales), la selección, combinación y ponderación de los miembros del conjunto (para hacer frente

Figura 6.1.

**Diagrama con una cadena de servicios climáticos simplificada basada en proyecciones de cambio climático**



Fuente: elaboración propia

a la diferente calidad de los sistemas y miembros del conjunto) y la corrección de sesgos de la salida del modelo (para abordar problemas de errores sistemáticos del modelo). El siguiente paso es el uso de modelos de aplicación o impacto que traducen las variables climáticas (p. ej., precipitación, temperatura, viento) en los indicadores y/o variables definidos por los usuarios (p. ej., rendimiento de cultivos, aporte de agua en embalses, factor de capacidad de la energía eólica, etc.). Finalmente, se puede hacer una evaluación en un periodo observacional.

El visor de escenarios de proyecciones regionalizadas para Centroamérica realiza la mayor parte de

las tareas relacionadas con los dos primeros pasos que aparecen en la Figura 6.1, compila y presenta toda la información con un formato uniforme además de incluir el paso de regionalización que en términos de cálculo es el más costoso. También incluye el paso último de visualización para las variables e indicadores incluidos en el visor.

La definición de nuevos indicadores sectoriales y la utilización de modelos de aplicación que traduzcan la evolución de variables climáticas en evolución de variables sectoriales requieren de la colaboración y coordinación con los especialistas de los diferentes sectores de actividad afectados por las condiciones climáticas.



© Shutterstock

Una acción desarrollada a partir de la cooperación entre  
homólogos de los servicios meteorológicos nacionales



# 7. Conclusiones

En este estudio temático se ha descrito la acción “Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para Centroamérica” desarrollada en el marco del programa EUROCLIMA+. El enfoque de esta acción se ha basado en el trabajo entre homólogos con una primera fase basada en la capacitación, desarrollo de una primera generación de escenarios y herramienta de visualización, y una segunda fase en la que el grupo de trabajo regional de escenarios de cambio climático de Centroamérica, conformado por personal técnico de los servicios meteorológicos nacionales de los 6 países participantes en la acción y el CRRH-SICA, toman el liderazgo en la generación y actualización de escenarios, interacción con usuarios y mantenimiento de la herramienta de visualización creada, contando con el apoyo técnico de la AEMET y de la cooperación europea por parte del Programa EUROCLIMA+.

Como conclusiones específicas de este trabajo, se destacan:

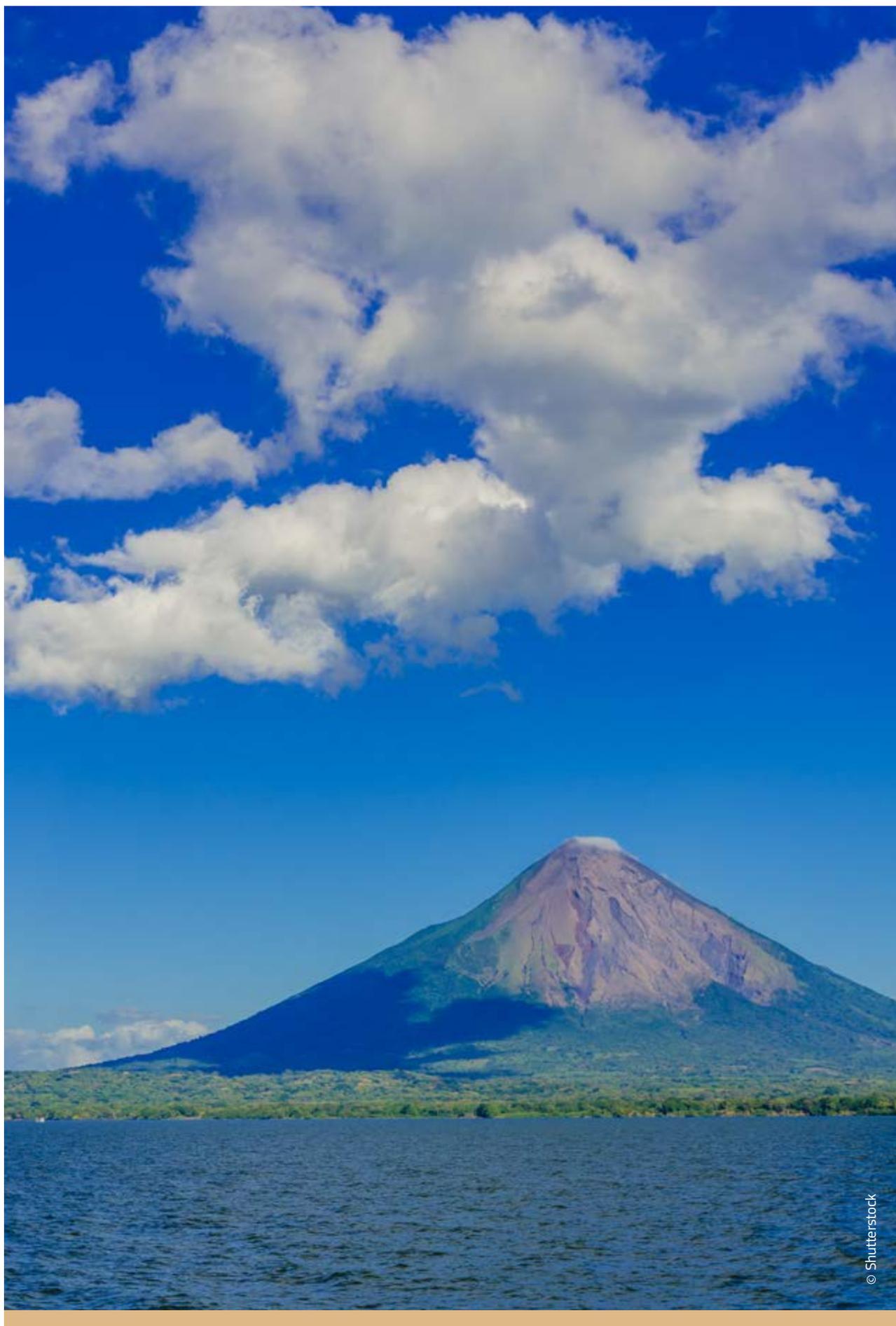
- La adecuada comprensión de los conceptos básicos asociados a los escenarios de cambio climático regionalizados es muy importante para realizar una adecuada gestión, uso y aplicación de los mismos.
- El desarrollo y mantenimiento de herramientas de visualización y descarga de datos es clave para facilitar el uso de la información climática por parte de la comunidad de impactos y de los sectores de usuarios que buscan planificar medidas de adaptación.
- Los escenarios regionalizados generados en el marco de esta acción utilizan la misma metodología, permitiendo la realización de análisis a nivel de la región de Centroamérica, multi-país (varios países dentro de la misma), nacional y subnacional. Al haberse utilizado 45 proyecciones climáticas, las posibilidades de análisis son muy amplias, mejorando significativamente la situación previa al inicio de la acción, en la que cada país contaba con un número limitado de proyecciones que diferían en cuanto a información de base, metodología y resolución.
- Los servicios meteorológicos nacionales han creado y están fortaleciendo sus capacidades en la generación y actualización de los escenarios regionalizados, lo que les permitirá proveer la información sobre escenarios climáticos requerida por los gobiernos nacionales para las comunicaciones nacionales sobre cambio climático ante la CMNUCC.
- Es importante tomar en cuenta una serie de buenas prácticas en el uso e interpretación de los datos del visor, explorando las incertidumbres, haciendo un uso climático de los datos y expresándolos en forma probabilística, corrigiendo el sesgo de los modelos, realizando una evaluación de los modelos globales y analizando y comparando toda la información contenida en el visor.
- Resaltar que la información contenida en el

visor puede servir de base para desarrollar servicios climáticos específicos para distintos grupos de usuarios.

- La existencia de un grupo de trabajo con fuertes capacidades técnicas, que tenga el cometido de generar y actualizar escenarios regionalizados y esté comprometido con el mantenimiento de la herramienta de visualización creada, es fundamental para facilitar el

uso de información con base científica para la planeación de políticas y medidas climáticas.

- Fomentar la interacción con los usuarios dando respuesta rápida a sus demandas y necesidades permitirá un flujo de información eficiente permitiendo avanzar más rápidamente hacia la comprensión de los riesgos y vulnerabilidades y planificación de medidas de adaptación específicas para los distintos sectores.



© Shutterstock



# Referencias

Amblar, M.P., Casado Calle, M.J., Pastor Saavedra, M.A., Ramos Calzado, P., Rodríguez Camino, E., 2017: *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Agencia Estatal de Meteorología, 102 pp.

<https://dx.doi.org/10.31978/014-17-010-8>

Amblar, M.P., Pastor Saavedra, M.A., Casado Calle, M.J., Ramos Calzado, P., Rodríguez Camino, E., 2018: Strategy for generation of climate change projections feeding Spanish impact community. *Adv. Sci. Res.*, 15, 217–230.

<https://doi.org/10.5194/asr-15-217-2018>

Brunet, M., Casado Calle, M.J., Castro, M., Galán, P., López Díaz, J.A., Martín Herreros, J.M., Pastor Saavedra, M.A., Petisco de Lara, S.E., Ramos Calzado, P., Ribalaygua Batalla, J., Rodríguez Camino, E., Sanz Zoydo, I., Torres, L., 2008: *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*. Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino, 158 pp.

<http://hdl.handle.net/20.500.11765/11785>

Casado Calle, M.J., Martín Herreros, J.M., Pastor Saavedra, M.A., Rodríguez Camino, E., 2011: *Evaluación de los modelos climáticos globales participantes en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC sobre España y la región euroatlántica*. Agen-

cia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 158 pp.

<https://hdl.handle.net/20.500.11765/12438>

Clark, M.P., R.L. Wilby, E.D. Gutmann, J.A. Vano, S. Gangopadhyay, A.W. Wood, H.J. Fowler, C. Prudhomme, J.R. Arnold & L.D. Brekke, 2016: Characterizing Uncertainty of the Hydrologic Impacts. *Curr Clim Change* 2, 55–64.

<https://doi.org/10.1007/s40641-016-0034-x>

Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald, and J.-G. Winther, 2013: Introduction. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5\\_Chapter01\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Chapter01_FINAL.pdf)

FIIAPP, AVAMET, 2020. *Visor de escenarios de cambio climático sobre Centroamérica. Manual de Usuarios*. Programa EUROCLIMA+.

[https://euroclimaplus.org/media/attachments/2021/09/29/manual\\_usuariov3.pdf](https://euroclimaplus.org/media/attachments/2021/09/29/manual_usuariov3.pdf)

Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C.

Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason and M. Rummukainen, 2013: Evaluation of Climate Models. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_Chapter09\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter09_FINAL.pdf)

Fox-Rabinovitz, M.S., J. Cote, M. Deque, B. Dugas, J. McGregor, 2006: Variable-Resolution GCMs: Stretched-Grid Model Intercomparison Project (SGMIP), *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, Volume 111, Issue D16. <https://doi.org/10.1029/2005JD006520>

Gutiérrez Llorente, J.M., Rodríguez Camino, E., Pastor Saavedra, M.A., Heras Hernández, F., Velasco Munguira, A., Sánchez, M., Gutiérrez, V., Pons, A., García Díez, M. San-Martín, D., 2017: Visor de escenarios de cambio climático de AdapteCCa: consulta interactiva y acceso a escenarios-PNACC 2017. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A 11; XI Congreso de la Asociación Española de Climatología celebrado en Cartagena entre el 17 y el 19 de octubre de 2018, Montávez Gómez, J.P. et al. (eds.). *El clima: aire, agua, tierra y fuego*. Madrid: Asociación Española de Climatología, p. 665-675. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/9945>

IPCC, 2014a: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

IPCC, 2014b: Glossary [Mach, K.J., S. Planton and C. von Stechow (eds.)]. In: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the*

*Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 117-130. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_Annexes.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_Annexes.pdf)

Kirtman, B., S.B. Power, J.A. Adedoyin, G.J. Boer, R. Bojariu, I. Camilloni, F.J. Doblas-Reyes, A.M. Fiore, M. Kimoto, G.A. Meehl, M. Prather, A. Sarr, C. Schär, R. Sutton, G.J. van Oldenborgh, G. Vecchi and H.J. Wang, 2013: Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_Chapter11\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter11_FINAL.pdf)

Lucio F.D.F. and Grasso, V., 2016: The global framework for climate services. *Clim. Serv.*, 2–3, pp. 52-53. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2017.06.009>

Maraun, D. and Widmann, M., 2018: *Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research*. Cambridge: Cambridge University Press.

Maraun, D., Widmann, M. and Gutiérrez, J.M., 2019: Statistical downscaling skill under present climate conditions: A synthesis of the VALUE perfect predictor experiment. *Int J Climatol.*, 39, 3692–3703. <https://doi.org/10.1002/joc.5877>

MAGRAMA 2013. *Cambio Climático: Bases Físicas. Guía resumida del Quinto Informe de Evaluación del IPCC, Grupo de Trabajo I*. Ed. Fundación Biodiversidad, Oficina Española de Cambio Climático, Agencia Estatal de Meteorología, Centro Nacional de Educación Ambiental, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 47 pp. [https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/mini-portales-tematicos/guia-resumida-grupo-trabajo\\_i\\_tcm30-376939.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/mini-portales-tematicos/guia-resumida-grupo-trabajo_i_tcm30-376939.pdf)

Miguez-Macho G., Stenchikov, G.L. y Robock A., 2004: Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate simulations. *J. Geophys. Res.*, 109, D13104.

<https://doi.org/10.1029/2003JD004495>

Mitchell, T.D. y M. Hulme, 1999: Predicting regional climate change: living with uncertainty. *Progress in Physical Geography*, 23 (1), 57-78.

Rodríguez Camino E., J. A. Parodi-Perdomo, J. F. Gonzalez-Rouco, M. Montoya-Redondo, 2018: Proyecciones climáticas. Cap. 29, 470-508. En *Física del caos en la predicción meteorológica. Historia y fundamentos de la meteorología, sistemas de predicción por conjuntos, predicción probabilista y aplicaciones, cambio climático y aspectos sociales*. Ed. C. Santos-Burguete. Pub. AEMET. 1089 pp.

<https://doi.org/10.31978/014-18-009-x.29>

Rummukainen, M., 1997: *Methods of statistical downscaling of GCM simulations*. Reports meteorology and climatology. Norrköping: Swedish Meteorological and Hydrological Institute. Technical report 80, SE-601 76. [https://www.smhi.se/poly\\_fs/1.124322!/RMK\\_80.pdf](https://www.smhi.se/poly_fs/1.124322!/RMK_80.pdf)

Santos Burguete, C., 2018: Predecibilidad. Cap. 12, 155-166. En *Física del caos en la predicción meteorológica. Historia y fundamentos de la me-*

*eteorología, sistemas de predicción por conjuntos, predicción probabilista y aplicaciones, cambio climático y aspectos sociales*. Ed. C. Santos-Burguete. Pub. AEMET. 1089 pp, 2018.

<https://doi.org/10.31978/014-18-009-x.12>

Stocker, T. F. y col., 2013a: Technical summary. En: *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Editado por Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, y New York, páginas 33-115.

Stocker, T. F. y col., 2013b: IPCC, 2013: summary for policymakers. En: *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Editado por Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, y New York.

Stocker, T. F. y col., 2013c *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1535 pp.

Von Storch H., H. Langenberg y F. Feser F., 2000: A Spectral Nudging Technique for Dynamical Downscaling Purposes. *Mon. Wea. Rev.* 128, 3664-3673.



Oficina de Publicaciones  
de la Unión Europea

